

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Е. М. ЗАЛКИНД, Ю. В. КОЗЛОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ОГРАЖДЕНИЙ
ПАРОВЫХ КОТЛОВ



МОСКВА • «ЭНЕРГИЯ» • 1980

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Ограждения котлов. Состояние. Проблемы	5
Глава вторая. Тепловые потери через ограждения и возможности их уменьшения	14
2-1. Тепловые потери в окружающую среду и наружная температура ограждений	14
2-2. Характеристики теплозащитных ограждений котлов	15
Глава третья. Материалы, применяемые для обмуровки и изоляции котлов	21
3-1. Физико-технические характеристики материалов	21
3-2. Применяемые материалы и их классификация	33
3-3. Огнеупорные растворы	38
3-4. Огнеупорные и жаростойкие бетоны	40
3-5. Теплоизоляционные материалы	45
3-6. Покровные материалы	55
3-7. Металлические изделия для крепления обмуровки и изоляции	56
Глава четвертая. Типовые узлы обмуровок котлов	64
4-1. Обмуровка из штучных огнеупорных изделий	64
4-2. Обмуровка из жаростойких бетонов	71
4-3. Натрубная обмуровка	76
4-4. Обмуровка горелок котлов	80
Глава пятая. Сборная обмуровка из плит автоклавного изготовления	86
5-1. Характеристики обмуровочных плит автоклавного изготовления	88
5-2. Использование плит автоклавного изготовления для обмуровок котлов	90
Глава шестая. Уплотнение ограждений котлов	94
6-1. Влияние неплотности ограждения на работу котла	94
6-2. Требования к конструкциям и материалам уплотнений	95
6-3. Узлы уплотнения ограждений	96
Глава седьмая. Мембранные газоплотные ограждения котлов	119
7-1. Совершенствование ограждений. Преимущества ограждений газоплотных котлов	119
7-2. Конструкции узлов цельносварных газоплотных экранов	122
7-3. Конструкция изоляции газоплотных экранов котлов	129
7-4. Наружное покрытие ограждений газоплотных экранов	135
7-5. Напыляемая тепловая изоляция	140
Глава восьмая. Утепленные топki паровых котлов	142
8-1. Назначение утепленных топок	142
8-2. Шкпы и их размещение на утепленных экранах	144

8-3. Набивные массы для утепленных экранов	148
8-4. Работа оштукатуренных утепленных экранов	149
8-5. Утепленные экраны из труб с поперечными ребрами	156
Глава девятая. Тепловой расчет обмуровки	159
9-1. Коэффициент освещенности	160
9-2. Средний угловой коэффициент	163
9-3. Определение температуры на внутренней поверхности стены обмуровки за экранами	170
9-4. Определение температуры на внутренней поверхности стены обмуровки неэкранированного газохода	174
9-5. Величины, необходимые для расчета ограждений	176
9-6. Определение температуры стенки гладкой трубы	178
9-7. Расчет распределения температуры по толщине плоских и цилиндрических ограждений	180
9-8. Оценка влияния металлических включений	186
9-9. Расчет на цифровых ЭВМ влияния теплопроводных включений	190
9-10. Определение коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности	195
9-11. Примеры практических расчетов обмуровок	197
Глава десятая. Моделирование тепловой работы ограждений	209
10-1. Общие положения	209
10-2. Моделирование температурных полей в ограждениях методом электротеплоаналогии	210
10-3. Исследование температурных полей составных ограждений методом конечных элементов	218
Глава одиннадцатая. Основы механического расчета обмуровок	225
11-1. Температурные деформации и температурные швы	225
11-2. Усилия от давления газов и расчет обшивки	229
11-3. Расчет опорных кронштейнов и их креплений	234
Глава двенадцатая. Стендовые и промышленные испытания ограждений котлов	243
12-1. Конструкции испытательных стендов и методики испытаний	243
12-2. Испытания нагаркающей обмуровки монтажного изготовления	246
12-3. Влияние фильтрации воздуха на температуру обмуровки	249
12-4. Испытания обмуровки автоклавного изготовления	251
12-5. Испытания изоляции газоплотных экранов	253
12-6. Стендовые испытания утепленных экранов	254
12-7. Промышленные испытания сборной обмуровки из плит автоклавного изготовления	256
12-8. Промышленные испытания изоляции газоплотных котлов	259
Приложения	265
Список литературы	284

Задкин Е. М. и Козлов Ю. В.

3-23 Проектирование ограждений паровых котлов. — М.: Энергия, 1980. — 288 с., ил.

В пер.: 90 к.

В книге дано краткое описание различных типов ограждений котлов большой и средней мощности, отмечены их преимущества и недостатки, даны рекомендации по выбору. Приведены характеристики и технические условия для материалов, используемых при проектировании ограждений. Дана сводка формул с подробными пояснениями для теплотового и механического расчета ограждений.

Книга рассчитана на инженеров-теплотехников, занимающихся проектированием и конструированием ограждений котлов.

3 30303-040 35-80. 2303020100

ББК 31.361

БП2.22

ЕВГЕНИЙ МИХАЙЛОВИЧ ЗАДКИН,
ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ КОЗЛОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОГРАЖДЕНИЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Редактор К. Ф. Роддатис

Редактор издательства С. К. Брешин

Переплет художника И. М. Хазанова

Художественный редактор Д. И. Чернышев

Технический редактор И. П. Собакина

Корректор М. Г. Гулина

ИБ № 643

Сдано в набор 07.09.79. Подписано в печать 18.03.80 Т-07103. Формат 84х108^{1/8}. Бумага типографская № 2. Гарн. шрифта литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 15,12. Уч.-изд. л. 15,68. Тираж 6000 экз. Заказ № 130. Цена 90 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7

© Издательство «Энергия», 1980

ПРЕДИСЛОВИЕ

Применение высокоэффективных изоляционных и обмуровочных материалов в ограждениях поверхностей нагрева теплотехнического оборудования позволяет уменьшить расход топлива на выработку электроэнергии и обеспечить экономичную работу энергоблоков. Существенную роль в экономичности работы котлов играют обмуровка, правильность ее проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации. При выборе нерациональных конструктивных решений, отступлений от проекта или некачественного монтажа, при применении малоэффективных теплоизоляционных и обмуровочных материалов и т. д. могут иметь место повышенные температуры наружной поверхности ограждений и потери теплоты в окружающую среду. Это ведет к ухудшению технико-экономических показателей и нарушению санитарно-гигиенических условий труда в помещении котельной.

Процесс проектирования обмуровок котлов требует проведения комплекса расчетных, проектных и экспериментальных работ, направленных на выбор оптимальной обмуровочной конструкции. Эти вопросы в основном и освещаются в данной работе. В книге изложены материалы, основанные на многолетнем опыте крупных котельных заводов и ряда организаций, являющихся ведущими в области проектирования, выполнения и усовершенствования ограждений: производственного объединения «Красный котельщик», Подольского завода им. Орджоникидзе (ЗиО), Барнаульского котельного завода (БКЗ), специальных конструкторских бюро СКБ Всесоюзного научно-исследовательского теплотехнического института (ВТИ) и ЦКБ Главэнергоремонта, ОРГРЭС (Союзтехэнерго), Уральского отделения ВТИ, Союзэнергоснабжения, Центрэнерготеплоизоляции, Главпроэнергомонтажа и др.

Авторы надеются, что предлагаемая книга окажет существенную помощь организациям и специалистам, за-

нимающимся вопросам проектирования, конструирования, исследования, изготовления, монтажа и эксплуатации обмуровок и изоляции котлов.

Технические величины и расчеты даны в единицах системы МКГСС и системе единиц, основанной на калории, поскольку в справочниках ГОСТ, ОСТ и ТУ физикотехнические показатели приводятся в единицах этих систем. Перевод этих единиц в международную систему единиц СИ дан в приложении I.

Авторы благодарны доктору техн. наук И. Я. Залкиндю за тщательный просмотр и ценные указания по данной работе, проф. К. Ф. Роддатсу за большую работу по редактированию и улучшению рукописи, инж. ЗноУ Л. И. Таран за большую помощь по оформлению рукописи. В книге гл. 1—3, 9, 11 написаны Е. М. Залкиндо, гл. 5, 7, 8, 10, 12 и § 9-9 написаны Ю. В. Козловым, остальные главы написаны совместно. Подготовка рукописи к печати осуществлялась Ю. В. Козловым. Все замечания и пожелания читателей, за которые авторы заранее приносят свою благодарность, просим направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия».

Авторы

Глава первая

ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВ. СОСТОЯНИЕ. ПРОБЛЕМЫ

Ограждения (обмуровки) котлов являются наружными стенами топочной камеры и газоходов, обеспечивая одновременно газоплотность и тепловую изоляцию. Конструкция ограждения современного котла зависит от конструкции самого котла — его трубной части и каркаса. Поэтому ограждения не могут рассматриваться и выполняться отдельно и самостоятельно. В связи с этим вопросы типизации конструкций ограждений, унификация элементов и узлов, входящих в них, сильно осложняются, так как каждая вновь выпускаемая серия котлов практически имеет свою специфическую конструкцию ограждений. Несмотря на трудности в унификации конструкций ограждений и их узлов, необходимо стремиться к однотипным принципиальным решениям с использованием одних и тех же проверенных и удобных обмуровочных и изоляционных материалов. Многолетний опыт конструирования и эксплуатации котлов показывает необходимость решения этих вопросов. Это позволило бы избежать ошибок при конструировании ограждений и повысить бы надежность их работы.

Условия работы ограждений различны. Они зависят от конструкции котла, ограждения и его расположения в газовом тракте. Вследствие широкого применения радиационных поверхностей (экранов) топочные камеры современных котлов полностью экранованы трубами с относительным шагом $s/d \leq 1,10$. Такое тесное экранирование позволило практически ликвидировать процессы шлакования стен в топках и снизить температуру на их внутренней поверхности (за трубами) до 400—500°C. Не экранованными поверхностями в топочной камере остаются амбразуры горелок, температура футеровки которых при входе в топку достигает 1400—1500°C. В мощных котлах в настоящее время производят экра-

нирование и амбразур горелок, что значительно удлиняет срок службы амбразуры. В топочной камере остаются не экранированными небольшие по площади лазы и отверстия для установок топочной гарнитуры (обдувочные, смотровые лючки и пр.).

В котлах с естественной циркуляцией в области размещения пароперегревателя, поворотной камере и в начале конвективной шахты условия для работы ограждений более тяжелые. Из-за отсутствия экранирования этих участков температура ограждений на внутренней их поверхности достигает 800—1000°C. Экранирование же этих участков газоходов для котлов с естественной циркуляцией связано с конструктивными трудностями и удорожанием котла. В прямоточных котлах эти газоходы в настоящее время экранированы. В последующих газоходах температура газов постепенно падает до 140—160°C.

При температуре газов ниже 450°C ограждения могут выполняться из углеродистой листовой стали без внутренней футеровки, но с наружной изоляцией.

Так как температуры за экранными поверхностями сравнительно невелики, то в ряде случаев можно заменить ограждения, состоящие из обмуровочных и изоляционных материалов, только высокотемпературной газоплотной изоляцией с защитным слоем.

Для газоплотных котлов, работающих под наддувом (с избыточным давлением в газоходах), вопрос решается иначе, так как они имеют полностью экранированные стены топки и всех газоходов. Герметичность достигается сваркой между собой экранирующих труб при помощи проставок между ними или специальных «плавников», прокатанных совместно с трубами. В прежних конструкциях газоплотность достигалась покрытием труб сплошным стальным листом, специально прикрепленным к ним, что в настоящее время применяется только при реконструкции котлов. На эти газоплотные ограждения наносится тепловая изоляция, наружная поверхность которой отделяется специальными покрытиями. В газоплотных и работающих под наддувом котлах, помимо наружной изоляции, имеются внутренние участки, которые защищают специальными покрытиями с футеровкой амбразур горелок. Ограждения газоплотных котлов должны быть выполнены так, чтобы потери теплоты в окружающую среду через ограждение находились в эко-

номически выгодных пределах (при соблюдении санитарно-гигиенических условий для обслуживающего персонала), а наружная температура поверхности ограждения не превышала нормативного значения. У котлов, работающих под разрежением с уравновешенной тягой в газоходах, должна быть обеспечена газоплотность, для работающих под наддувом — герметичность. Газоплотность ограждений, не имеющих специальных покрытий, необходима для предотвращения проникновения холодного воздуха в газоходы. На нагревание этого воздуха расходуется дополнительная теплота топлива, которая теряется с продуктами сгорания. Кроме того, в помещении котельной сквозняки неплотности в ограждении могут проникать горячие продукты горения (газы, пыль) и нарушать санитарно-гигиенические условия для обслуживающего персонала. Для котлов, работающих под наддувом, нужна полная герметичность ограждений, так как раскаленные газы, проникая через малейшие неплотности, создают обстановку повышенной опасности для обслуживающего персонала. При этом может возникнуть аварийная ситуация из-за перегрева металлических деталей ограждения. Материалы, входящие в состав ограждения, должны обладать малой теплопроводностью, небольшой массой, удобно укладываться и быть недефицитными. Эти свойства обеспечивают хорошую тепловую защиту, малую массу конструкций, сокращение сроков монтажа и уменьшение стоимости. В связи с увеличением производительности котлов, входящих в мощные блоки 200, 300 МВт и более, приобретает важное значение надежность работы ограждения. Простой каждого блока связан с большими экономическими потерями в народном хозяйстве. Также имеет большое значение ремонтоспособность ограждения. Выработаны специальные требования, которые должны учитываться при проектировании. Практика эксплуатации котлов показала, что некоторые конструкции ограждений с применением обмуровочных и изоляционных материалов (например, части щитовой обмуровки) не удовлетворяют требованиям ремонтоспособности. При капитальных ремонтах такие щиты приходится заменять полностью с внесением конструктивных изменений в ограждение.

Современные конструкции ограждений мощных котлов можно разделить на три основные группы:

а) накаркасные или щитовые, опирающиеся на кар-

кас в виде отдельных щитов и панелей-блоков, которые не связаны с трубной системой котла;

б) **натрубные**, которые непосредственно прикреплены к трубам экранной системы и могут перемещаться совместно с ними при температурных деформациях труб;

в) **газоплотные**, предназначенные для работы газоходов без присосов и с избыточным давлением в газоходах.

Помимо приведенных трех групп, имеются комбинированные ограждения, у которых топочная камера имеет натрубную конструкцию, а газоходы — накаркасную.

Каждая из перечисленных групп ограждений имеет свои преимущества и недостатки, как конструктивные, так и технологические. Щитовые обмуровки могут выполняться в любое время года из заранее заготовленных щитов, доставленных к месту их установки, когда помещение котельной уже выстроено и перекрыто. При хорошем выполнении щитовые ограждения достаточно газоплотны. Однако ремонт щитового оборудования на котле практически невозможен. Поэтому ремонт вынужденно производится путем замены щитов обычной кирпичной кладкой с изоляцией, что, конечно, не рационально и имеет местный характер. Срок службы щитов при качественном изготовлении составляет от 8 до 10 лет.

Натрубные ограждения проще и легче щитовых, удобней и быстрее ремонтируются, однако их выполнение требует сплошного экранирования газоходов. Производство работ (изготовление блоков) на монтажной площадке возможно только при плюсовой температуре окружающего воздуха. Это ведет к сезонности работ, либо приходится сооружать громоздкие и дорогостоящие тепляки.

Недостатком, присущим обоим типам ограждений, является большое количество узлов и доводочных работ, которые необходимо выполнять непосредственно на котле (заделка стыков, узлы прохода труб через стены, потолочные перекрытия и пр.). Доводочные работы в некоторых случаях составляют до 50% общего объема обмуровочных работ.

Газоплотные ограждения лишены основного недостатка — неплотности. Конструкции ограждений со стальным листом выполняются аналогично натрубным, но без защитного слоя против износа золой. Газоплотные со сплошными экранами из труб с проставками или

плавниками покрывают изоляцией с последующей отделкой поверхности. Этот тип ограждений является наиболее перспективным.

Основными показателями для современных ограждений мощных котлов являются масса обмуровки; объем, как общий, так и удельный (приходящийся на 1 т про-

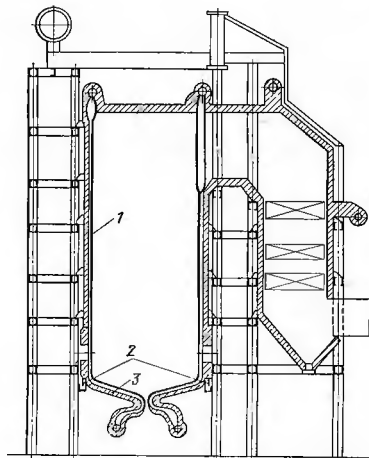


Рис. 1-1. Схема котла со щитовой накаркасной обмуровкой.

1 — накаркасная щитовая обмуровка; 2 — гидравлический затвор по периметру топки; 3 — натрубная обмуровка циклонового пода.

изводительности котла); удельные трудозатраты на выполнение 1 м³ обмуровочных и изоляционных работ и стоимость сооружения.

На рис. 1-1 показана схема накаркасного ограждения котла в блочном исполнении. Отличительной особенностью этого ограждения является наличие в нижней части топки гидравлического затвора, расположенного по все-

му периметру и необходимого для уплотнения холодной воронки. Холодная воронка при температурном удлинении экранных труб опускается примерно на 100—120 мм, при этом образуется щель по всему периметру между по-

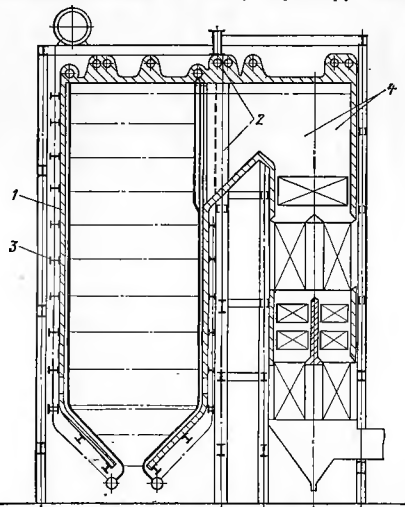


Рис. 1-2. Схема котла с натрубной обмуровкой топки.

1 — натрубная обмуровка; 2 — температурный шов; 3 — поперечные балки жесткости экранной системы; 4 — накаркасная щитовая обмуровка.

движной и неподвижной частями ограждения. Гидравлический затвор может быть заменен плотной асбестовой тканью, имеющей складку по всему периметру, допускающей перемещение до 150 мм.

На рис. 1-2 показана схема комбинированного ограждения, натрубного в части топочной камеры и щитового в последующих конвективных газоходах. Основной недостаток такого ограждения — скользящий шов между

подвижной и неподвижной частями ограждений. Скользящие швы расположены вертикально по бокам при выходе из топки в газоповоротную камеру и горизонтально под наклонной частью газохода пароперегревателя. Эти швы имеют различные конструкции уплотнений, которые часто выходят из строя и не обеспечивают необходимой плотности. Ремонт швов связан с заменой уплотняющей набивки, представляет трудности и возможен только в период остановки котла. Как уже упоминалось, недостатком натрубного ограждения является появление в нем сквозных трещин, обусловленных разностью температурных удлинений экранных труб и их изоляции с наружной обмазкой. При тщательном выполнении многослойной конструкции присосы в области топочной камеры удастся свести к минимуму. Полностью устранить присосы можно только при помощи обшивки стальным листом по трубам или применением цельносварных экранов. Одновременно требуются установка горелочных аппаратов непосредственно на экранных трубах и присоединение пылевоздухопроводов к горелкам, обеспечивающее необходимые перемещения.

Натрубные ограждения значительно легче накаркасных. Масса натрубного ограждения обычно составляет от 100 до 120 кг/м² при толщине от 130 до 160 мм; накаркасные ограждения имеют массу от 160 до 220 кг/м² при толщине от 160 до 220 мм.

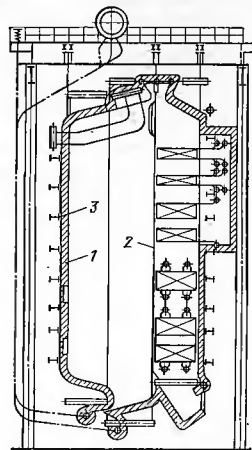


Рис. 1-3. Схема газоплотного котла с натрубной изоляцией.

1 — натрубная изоляция; 2 — задний экран топки; 3 — балки жесткости экранов.

На рис. 1-3 приведена схема газоплотного ограждения для котла, работающего под наддувом. Котел имеет совмещенную П-образную компоновку. Задний экран топки является одновременно одной из стен конвективной шахты. При сомкнутой компоновке не нужно экранирование горизонтального газохода, соединяющего топку с конвективной шахтой котла, необходимое при разомкнутой компоновке. При этом сокращается поверхность ограждающих стен, уменьшается количество поясов жесткости и количество экранных блоков с монтажными стыками труб, что увеличивает надежность работы котла.

К недостаткам сомкнутого варианта компоновки следует отнести повышенные тепловые нагрузки на трубы заднего экрана, обогреваемые с двух сторон, и сложность узлов крепления конвективных поверхностей нагрева. Ограждения газоплотных котлов выполняют из плитной или напыляемой изоляции толщиной 100—150 мм. В зависимости от типа наружного защитного покрытия и толщины изоляции масса изоляции составляет 30—50 кг/м². Такие ограждения просты в конструктивном отношении, надежны в эксплуатации, позволяют значительно сократить сроки и трудозатраты при их монтаже и ремонте.

Объемы и массы обмуровочных и изоляционных материалов для некоторых современных мощных котлов приведены в табл. 1-1. В табл. 1-1 включены котлы, изготавливаемые заводами ТКЗ и ЗнО. При подсчете массы принято изоляционными материалами считать только те, объемная масса которых менее 1000 кг/м³ и коэффициент теплопроводности менее 0,25 ккал/(м·ч·°С) при температуре 20°С. Поэтому диатомовый кирпич и асбесто-диатомовый бетон отнесены к изоляционным материалам.

Из табл. 1-1 видно, что удельные показатели общего расхода материалов на ограждения котлов обоих заводов мало отличаются друг от друга, а состав материалов, входящих в ограждения, идентичен и достаточно ограничен. Меньшее количество материалов соответствует газомазутным, большее — пылеугольным котлам.

Для вновь проектируемых газоплотных котлов объем изоляции вместо 70% будет достигать 90—95%. Поэтому выбору материалов и конструкции изоляции должно уделяться серьезное внимание. Следует отметить, что масса ограждений современного мощного котла составляет около 30% общей массы котла. Основные технико-

Объемы и массы обмуровочных и изоляционных материалов теплограждений котлов¹

Наименование материалов	Плотность ρ , кг/м ³	Типы котлов и их производительность, т/ч							
		Котлы ТҚЗ				Котлы ЗиО			
		ТГМ-94; 500	ТП-100; 640	ТП-210; 950	ТП-200; 2500	ПК-47; 640	ПК-40; 640	ПК-41; 950	П-50; 950
Кладка из нормального шамотного кирпича	1900	41/78	64/122	91/174	378/717	141/268	149/283	7/14	141/268
Кладка из диатомового термоизоляционного кирпича	600	5/3	70/42	55/33	290/174	254/153	333/200	158/55	295/177
Кладка из шамотного легковесного кирпича	800	—	—	—	—	267/214	303/242	51/41	—
Кладка из теплоизоляционных плит (совелит и др.)	400	270/108	465/186	590/236	1574/650	336/134	403/161	614/246	600/240
Кладка из жаростойкого бетона	1900	230/440	255/490	420/800	945/1800	70/133	60/115	150/285	390/740
Кладка из теплоизоляционного бетона	800	340/272	400/320	790/564	1500/1200	20/16	25/20	450/344	350/270
Уплотнительная обмазка (магнезальная)	1400	30/42	72/101	30/42	61/86	30/42	—	60/84	13/19
Хромиговая масса по шптам	3000	37/111	46/138	92/276	—	—	35/105	—	26/78
Всего	—	919/952	1363/1372	1962/1987	4840/4883	1118/950	1308/1126	1470/1109	1815/1792
В том числе изоляционных материалов	—	615/383	935/548	1375/833	3354/2004	877/517	1064/623	1253/726	1245/687
Расход материалов на 1 т производительности котла	—	1,84/1,91	2,14/2,15	2,07/2,10	1,94/1,96	1,74/1,50	2,05/1,75	1,55/1,17	1,91/1,79

¹ В числителе — объем, м³; в знаменателе — масса, т.

экономические показатели для современных ограждений имеют в среднем следующие значения:

Масса ограждений, отнесенная к 1 т производительно- сти котла, т/т:	
для натрубных конструкций	1,1—1,2
для наваркашеских щитовых конструкций	1,8—2,0
для газоплотных с цельносварными экранами	0,5—0,6
Сметная стоимость изготовления и монтажа, руб/т	100—120
Трудозатраты на 1 т массы ограждения, чел-дней/т:	
для старых конструкций из штучных материалов	8—10
для конструкций облегченного типа с применением термоизоляционных материалов	5—7
Производительность обмуровщиков и изолировщиков при должной организации работ, м ² /чел-дн:	
для конструкций облегченного типа	0,15—0,2
для кирпичной кладки	0,11
для блочных конструкций при работах на площадке	0,2—0,23
доводочные работы на самом котле	0,08—0,1
в среднем по котлу для блочных конструкций	0,12—0,13

В последнее время в связи с внедрением механизации изоляционных работ эти показатели меняются, поэтому приведенные данные следует рассматривать как ориентировочные.

Глава вторая

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ

2.1. ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И НАРУЖНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ОГРАЖДЕНИЙ

Уменьшению тепловых потерь котлов и другого энергетического оборудования уделяется большое внимание. Это связано с экономичностью работы и санитарно-гигиеническими условиями для обслуживающего персонала. Подробное рассмотрение этих вопросов с выявлением основных факторов, влияющих на тепловые потери, позволяет устранить ряд ошибочных положений, существующих в настоящее время.

Тепловые потери в окружающую среду $q_{\text{в}}$, как известно, являются составной частью теплового баланса котла и обычно нормируются в процентах нижней рабочей теп-

лоты сгорания топлива $Q_{\text{в}}$. По действующим правилам технической эксплуатации тепловых электростанций (ПТЭ) при температуре окружающего воздуха в котельном помещении $t_{\text{в}}=25^{\circ}\text{C}$ потери теплоты не должны превосходить $q_{\text{в}}^{\%} \leq 300$ ккал/(ч·м²), а наружная температура ограждения $t_{\text{н}} \leq 55^{\circ}\text{C}$. По старым нормам ПТЭ наружная температура на поверхности ограждений допускалась до $t_{\text{н}}=70^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающего воздуха в котельной до 35°C , что создавало тяжелые санитарно-гигиенические условия для обслуживающего персонала. Для установленных за последние 10—12 лет котлов их наружные ограждения спроектированы согласно новым правилам ПТЭ.

По нормативному методу теплового расчета котлов [2-1] для вновь проектируемых котлов значения потерь $q_{\text{в}}$ зависят от производительности котла и не должны превосходить значений, приведенных ниже:

Производитель- ность котла, т/ч	20	40	80	100	120	200	300	500	700
Тепловые потери $q_{\text{в}}^{\%}$, %	1,3	1,0	0,75	0,7	—	—	0,45	0,4	0,2

По зарубежным данным [2-2—2-3], при соблюдении всех требований к качеству изоляции ограждения тепловые потери в окружающую среду и наружная температура ограждений современных котлов не превышают соответственно 250 ккал/(ч·м²) и 54°C .

Конструкции ограждения выполнены либо в виде цельносварного плавникового экрана, либо как газоплотные со стальными листами по трубам [2-3].

2.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ КОТЛОВ

Ниже приведены эксплуатационные показатели ограждений отечественных котлов средней и большой мощности по данным обследований и испытаний, производившихся ОРГРЭС и ЦКТИ (НПО ЦКТИ).

Котел ТП-70, установленный на Приднепровской ГРЭС, имеет натрубную конструкцию ограждений топочной камеры. Средние значения температуры ограждения и окружающего воздуха $t_{\text{н}}$ даны в табл. 2-1.

Котел ПК-41, установленный на Конаковской ГРЭС, имеет щитовое ограждение из асбестодиазотомового бетона. По замерам сле-

Таблица 2-1

Температура поверхности ограждения

Участок замера температуры	Отметка, м	$t_{\text{о.б.м.}}^{\circ}\text{C}$ (наружная)	$t_{\text{в.}}^{\circ}\text{C}$
Боковая правая стена топки	7,0	38—40	11
	20,0	50—62	17
	29,0	50	19
Потолочное перекрытие над пароперегревателем и над конвективной шахтой	—	50	31—36
	—	46—50	23—26
Газоповоротная камера, боковые стены	34	44	25—30
	28	40—50	30—35
Задняя стена конвективной шахты	34	30—38	20—25
Район экономайзера II ступени » » I ступени	—	40—58	36—50
	—	26—50	17—22

диалстов ЦКТИ тепловые потери и наружная температура поверхности ограждения составляют: $q_0 = 100-250$ ккал/(ч·м²) при местных отклонениях до 450 ккал/(ч·м²); $t_{\text{в.}} = 40-50^{\circ}\text{C}$.

Котел П-50 Каширской ГРЭС с шитовым ограждением из шамотобетонного слоя по замерам ЦКТИ имеет наружную температуру ограждения на некоторых участках до $75-85^{\circ}\text{C}$ из-за недопустимо высокой температуры окружающего воздуха ($60-65^{\circ}\text{C}$). При этом тепловые потери составляют $250-300$ ккал/(ч·м²).

Котел ТГМП-324 производительностью 1000 т/ч, установленный на Киришской ГРЭС, имеет газоплотное ограждение из цельносварных экранов. Тепловые испытания ОРГЭС показали, что из-за неудачной с тепловой точки зрения конструкции ограждения (большое количество металлических штырей и креплений, проходящих сквозь изоляцию) средние тепловые потери большей части ограждения близки к предельно допустимым значениям, а в ряде случаев превосходят их.

При правильно спроектированном и выполненном ограждении котла наружная температура ограждения не превышает 50°C , а тепловые потери 250 ккал/(ч·м²), в противном случае температура наружной поверхности ограждений и температура окружающего воздуха значительно превышают нормативные значения, создавая тем самым тяжелые условия эксплуатации.

Существует мнение, что основные тепловыделения в котельном помещении происходят вследствие потока теплоты через ограждающие конструкции котла и недостаточной циркуляции воздуха в помещении. Однако анализ показывает, что суммарное тепловыделение в котельной ячейке определяется и другими факторами. Основ-

Таблица 2-2

Источники тепловыделения в котельном помещении

Узел котельной ячейки	Тепловыделение, ккал/ч	Отношение к теплопотерям установок, %
Изолированные элементы короба, трубопроводы и т. д. в пределах котла	430 000	29,8
Ограждения котла	540 000	37,5
Итого по котлу	970 000	67,3
Газопроводы в котельной	300 000	20,8
Электрические машины	100 000	7,0
Трубопроводы в пределах котельной ячейки	70 000	4,9
Итого	470 000	32,7
Всего по установке	1 440 000	100

ное тепловыделение идет от трубопроводов в пределах котла, газопроводов, от вспомогательного оборудования и т. д. Циркуляция воздуха при нормальном состоянии ограждений котлов и вспомогательного оборудования обеспечивается дутьевыми вентиляторами в течение периода, исключающего холодное время года. Для выявления источников повышенных тепловыделений по котлу необходимо в каждом конкретном случае иметь баланс тепловых потерь по котельной ячейке. Например, в табл. 2-2 приведены данные ОРГЭС по распределению тепловыделений для котла производительностью 230 т/ч.

Из табл. 2-2 видно, что из всего количества теплопотерь установок только около 67% приходится собственно на котел. Для этого котла с параметрами $p \approx 110$ кгс/см²; $t_{\text{в.}} = 510^{\circ}\text{C}$; при температуре питательной воды $t_{\text{п.в.}} \approx 215^{\circ}\text{C}$; при сжигании топлива АШ с $Q_{\text{Р}} \approx 6000$ ккал/кг при к. п. д. $\eta_{\text{к.п.д.}} \approx 0,9$ расход топлива составляет $B = 24500$ кг/ч. Потери тепла собственно котла составляют:

$$q_{\text{к}}^{\text{к}} = 100 \frac{970\,000}{24\,500 \cdot 6000} = 0,66\%,$$

т. е. значение, близкое к нормативному, приведенному выше для естественных котлов. При этом следует отметить, что ограждения спроектированы по старым нормам ПТЭ. Воздух, нагретый тепловым потоком, через ограждения котла ($Q_{\text{к}} = 970\,000$ ккал/ч) удаляется дутьевыми вентиляторами. Для рассматриваемого котла количество воздуха, необходимое для горения, составляет $V \approx 200\,000$ м³/ч. Приняв удельную объемную теплоемкость для воздуха $c_{\text{в.}} = 0,3$ ккал/(м³·°C), температуру воздуха, поступающего в котель-

ное помещение, $t'_в = 10^\circ\text{C}$ и удаляемого $t''_в = 30^\circ\text{C}$, найдем, что количество отведенной теплоты с воздухом составит:

$$Q_в = Vc_в(t''_в - t'_в) = 200\,000 \cdot 0,3(30 - 10) = 1,2 \cdot 10^6 \text{ ккал/ч.}$$

Этот подсчет показывает, что дутьевые вентиляторы справляются с эвакуацией тепловыделений через ограждения котла.

Более подробные тепловые испытания были проведены ОРГРЭС на газоплотном котле ТГМП-324. В табл. 2-3 дано распределение тепловых потерь через отдельные элементы ограждений. Для определения $q_5^к$ необходимо из суммарного значения тепловых потерь, указанных в таблице, вычесть потери теплоты, не связанные с ограждениями собственно котла. Значение тепловых потерь, отнесенное к потерям через ограждения котла, включая его трубопроводы, составит:

$$Q_k = 3240,5 \cdot 10^3 - (362,4 + 375) \cdot 10^3 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ ккал/ч.}$$

При расходе топочного мазута примерно 75 000 кг/ч и его рабочей низшей теплоте сгорания $Q_p^H = 9800 \text{ ккал/кг}$ значение $q_5^к$ составит:

$$q_5^к = \frac{2503,5 \cdot 10^3}{9800 \cdot 75 \cdot 10^3} \cdot 100 \approx 0,34\%,$$

что значительно превосходит допускаемое значение.

Анализ тепловых потерь через отдельные поверхности котла (см. табл. 2-3) показывает, что очень большие потери [до 346 ккал/(ч·м²)] происходит за счет неудовлетворительной изоляции трубопроводов. Далее следует признать неудовлетворительной изоляцию перекрытий над топкой [338 ккал/(м²·ч)] и конвективной частью [380 ккал/(м·ч²)]. Значительны тепловые потери через ограждения стен и поясные балки жесткости, значение которых составляет 251—285 ккал/(ч·м²).

Произведем далее оценку потери теплоты в тоннах условного топлива. Расход топлива в переводе на условное составит:

$$B = 75 \frac{9800}{7000} = 114 \text{ т/ч.}$$

Потери теплоты в окружающую среду через ограждения котла $q_5^к = 0,34\%$ и в условном топливе

$$b_5^к = 114 \cdot 0,34 \cdot 10^{-2} = 0,39 \text{ т/ч.}$$

За год при эксплуатации котла в течение 6500 ч при полной нагрузке

$$B_5^к = 0,39 \cdot 6500 = 2520 \text{ т/год.}$$

При нормативных тепловых потерях $q_5^к \leq 0,2\%$ ежегодный перерасход топлива составит:

$$\Delta B = 2520 - 2520 \cdot \frac{0,2}{0,34} = 2520 - 1480 = 1040 \text{ т/год.}$$

Распределение тепловых потерь

Элементы котла	Наименование поверхностей	Площадь, м ²	Площадь, %	Потери теплоты, ×10 ⁻³ ккал/ч	Потери теплоты, %	Средний те- пловой поток, ккал/(м ² ·ч)
Топочная ка- мера	Ограждение стен	1612	22,8	406	36,6	251
	Перекрытие над топкой (шатер)	425	6,0	143	12,9	338
	Балки жесткости (пояса)	402	5,5	115	10,3	285
	Горелки	600	8,5	91	8,2	152
	Короба горячего воздуха	4050	57,2	356	32,0	88
	Итого	7089	100,0	1110	100,0	155
Конвективная шахта	Ограждение стен	1075	57,8	287	54,4	267
	Перекрытие над конвективной шахтой (шатер)	425	22,7	161	30,4	380
	Балки жесткости (пояса)	220	11,8	63,7	12,0	290
	Бункера	145	7,7	16,8	3,2	11,6
	Итого	1867	100,0	528,5	100,0	283
Прочие тепло- отдающие по- верхности	Воздухопроводы и регенеративные возду- хоподогреватели	3658	51,0	362,0	22,5	100
	Трубопроводы в пределах котла	2504	34,8	865,0	54,0	346,0
	Главные паропроводы	1035	14,2	375,0	23,5	368,0
	Итого	7197	100,0	1602,0	100,0	224,0
19	Всего по котлу	16 153	—	3240,5	—	—

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ОБМУРОВКИ И ИЗОЛЯЦИИ КОТЛОВ

3-1. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

При цене условного топлива около 20 руб/т годового перерасход на эксплуатационные нужды может быть приближенно оценен в 20 000 руб/год. Отметим, что расчеты проведены без учета амортизационных отчислений на стоимость дополнительных мероприятий по повышению эффективности тепловой изоляции.

Конструкция ограждений стен котла ТГМП-324 состоит из стальной наружной обшивки, которая крепится при помощи штырей, проходящих через изоляцию и приваренных к экранным трубам, имеющих температуру в среднем 500°C. Эти штыри и отводят теплоту к наружной стальной обшивке, повышая ее температуру до 70°C [2-5]. Влияние крепежных штырей на растекну теплоты по металлической обшивке значительно. Так, если в середине обшивочного листа удельные тепловые потоки составляют 120—150 ккал/(ч·м²), то в районе крепления они превышают 300 ккал/(ч·м²). Отсюда видно, что значения потерь теплоты во внешнюю среду через ограждения зависят от способа крепления изоляции ограждений и ее качества.

Металлические включения в ограждениях существенно повышают тепловые потери, поэтому необходимо обращать внимание на их размещение и конструкцию. Проведенные исследования в этой области при помощи моделирования и непосредственных измерений показывают, что в тех случаях, когда включения металла в виде ребер, штырей, шайб и т. д. выходят наружу изоляционного слоя, они могут увеличивать потери теплоты через ограждения на 30—40%, а в некоторых случаях и больше.

По данным лаборатории тепловой изоляции Уральского филиала ВТИ, металлические элементы включений дают примерно следующее увеличение тепловых потерь через ограждения, %:

Щеллеры на трубах экрана (№ 20 через интервалы в 1 м по высоте)	14,7
Штыри без шайб диаметром 12 мм с шагом 300×300 мм для креплений	12,8
Шайбы, приваренные на штырях	15
Металлические ребра толщиной $\delta = 5 \div 6$ мм, шириной 60 мм, утопленные в изоляцию	6
Поясные двутавровые балки № 36 с интервалами (по высоте) около 3,0 м	10—1

Это увеличение тепловых потерь необходимо учитывать при расчетах ограждений, особенно в натрубных обмуровках. Практически можно считать, что утопленные в слой изоляции ребра дают увеличение потерь до 6% и штыри с утопленными под покровный слой шайбами — до 20%. Более подробно влияние теплопроводных включений на тепловые потери через ограждения в окружающую среду изложено в гл. 9 и 10.

Из вышесказанного следует, что уменьшение тепловых потерь котлов является актуальной проблемой современной энергетики, особенно если учесть дефицит топлива.

Снижение тепловых потерь до экономически выгодных пределов должно обязательно сопровождаться обеспечением санитарно-гигиенических условий для обслуживающего персонала.

Качество ограждений при их конструировании и выполнении обеспечивается в первую очередь правильным выбором и рациональным применением входящих в их состав материалов. Для этого необходимы знание основных физико-технических свойств материалов и умение оценивать их качественные показатели. К основным свойствам и физико-техническим характеристикам материалов относятся объемная масса, плотность, пористость, влажность, водопоглощение, прочность, упругость, твердость, теплопроводность и некоторые другие.

Объемная масса — масса единицы объема материала в естественном состоянии. Объемная масса в отличие от плотности определяется вместе с порами. Для определения объемной массы необходимо массу сухого материала разделить на его объем:

$$\gamma = \frac{G}{v}.$$

Указывая объемную массу материала, всегда следует оговаривать его влажность. Воздушно-сухое состояние соответствует материалу, который длительное время находился на воздухе и поэтому содержит некоторое количество влаги.

Плотностью называют массу единицы объема материала без пор

$$\gamma_0 = \frac{G_{\text{пл}}}{v}.$$

Пористость есть отношение объема пор к полному объему материала и характеризует степень заполнения его объема (мелких пор) воздухом:

$$p_0 = \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0} \cdot 100.$$

Кажущейся пористостью называется отношение объема открытых пор ко всему объему материала.

Влажность (содержание влаги в материале) резко повышает теплопроводность, так как влага вытесняет воздух из пор и заполняет их. Поскольку теплопроводность воды в десятки раз больше теплопроводности воздуха, то даже незначительное количество влаги в материале заметно увеличивает теплопроводность последнего. Различают абсолютную и относительную влажность:

$$W_0 = \frac{G_{вл} - G_{сух}}{G_{сух}} \cdot 100;$$

относительная

$$W = \frac{G_{вл} - G_{сух}}{G_{вл}} \cdot 100,$$

где $G_{вл}$, $G_{сух}$ — массы влажного и высушенного материала.

Водопоглощение — степень заполнения объема открытых пор материала водой при его кипячении. Если $G_{сух}$ — масса сухого материала и $G_{вл}$ — масса материала после его кипячения в воде, то водопоглощение равно, %:

$$W_{\text{погл}} = \frac{G_{вл} - G_{сух}}{G_{сух}} \cdot 100.$$

Насыщение материала водой отрицательно сказывается на его свойствах — увеличивается теплопроводность и понижается прочность вследствие ослабления связей между частицами.

Прочность — свойство материала, которое характеризует его сопротивление разрушению от напряжений, возникающих при различных нагрузках. Прочность материала зависит от температуры. Для огнеупорных, жаростойких и строительных материалов, применяемых в ограждениях, основной характеристикой прочности является временное сопротивление сжатию или, как его иногда называют, предел прочности на сжатие:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P_{\text{разр}}}{F},$$

где $P_{\text{разр}}$ — нагрузка, разрушающая образец, кгс; F — площадь, см².

Прочность на сжатие для некоторых строительных материалов характеризуется марками, цифровое значение которых равно пределу прочности.

Для изоляционных штучных материалов дополнительной характеристикой является предел прочности при изгибе

$$\sigma_{\text{из}} = \frac{M_{\text{из}}}{W},$$

где $M_{\text{из}}$ — изгибающий момент, действующий на образец, кгс·см; W — момент сопротивления сечения образца, см³.

Для металлов основной характеристикой является предел прочности на растяжение. Для сталей пределы прочности на растяжение и на изгиб практически одинаковы.

Упругость — способность материала деформироваться под нагрузкой и восстанавливать свою первоначальную форму после разгрузки.

Пластичность — способность материала принимать заданную форму под действием внешних усилий, без образования трещин, и сохранять ее после снятия усилий.

Твердость называется способностью материала сопротивляться проникновению в него другого тела. Материалы, имеющие различную прочность на сжатие и изгиб, могут мало отличаться по твердости. Поэтому только твердость не может служить показателем прочности материала. Для однородных материалов твердость определяется по шкале Мооса.

Истираемость материала определяется по изменению массы образца, % (в лабораторных условиях производят обдвку образцов пескоструйными аппаратами).

$$\text{Истираемость} = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100,$$

где G_1 и G_2 — масса образца до и после истирания.

Определение этой характеристики необходимо потому, что футеровка газоходов истирается частицами золы и топлива, содержащимися в потоке уносимых газов. Этот сложный процесс называют износом. Износоустойчивость огнеупорных и футеровочных материалов имеет большое значение для ограждений котлов. Особенно это относится к конвективным газоходам, в которых скорости газов достигают 10 м/с и более. Ввиду того, что зола некоторых углей имеет высокий абразивный характер, она подвергает износу не только поверхность футеровки газоходов, но и расположенные в них поверхности нагре-

ва, для которых предусматривается специальная защита. Высокими абразивными свойствами обладает зола углей Экибастузского месторождения.

Теплопроводность — способность материала проводить через свою массу теплоту. Количество теплоты, проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность F , называется тепловым потоком.

Тепловой поток через плоскую однородную стенку выражается формулой

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_2 - t_1) F,$$

где t_2, t_1 — температуры противоположных сторон стенки, °C; F — поверхность плоской стенки, м²; δ — толщина стенки, м; λ — коэффициент теплопроводности, ккал/(м×Ч×°C).

Часто тепловой поток, проходящий через стенку, записывается в другой форме:

$$Q = \frac{t_2 - t_1}{R} F,$$

где $R = \delta/\lambda$ — термическое сопротивление стенки.

Коэффициент теплопроводности λ характеризует тепловую изоляционную способность материала. Для пористых материалов он пропорционален объемной массе γ и для воздушно-сухих условий (при влажности от 1 до 7%) может быть определен приближенно по формуле, предложенной В. П. Некрасовым:

$$\lambda = \sqrt{0,0196 + 0,22\gamma^2} - 0,14.$$

Мелкопористые материалы менее теплопроводны по сравнению с крупнопористыми. Объясняется это тем, что в крупных порах возникает интенсивное движение воздуха, которое сопровождается переносом теплоты. При повышении температуры теплопроводность большинства материалов увеличивается вследствие увеличения кинетической энергии молекул воздуха в порах и возрастания их скорости движения.

Теплоемкостью тела называется количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг тела на 1°С. Тогда количество теплоты, воспринятое телом при нагревании, равно:

$$Q = Gc(t_2 - t_1),$$

где G — масса материала, кг; c — удельная теплоемкость, ккал/(кг×°C); t_1, t_2 — температура тела до и после нагревания.

Если наружное давление воздуха отличается от давления в газоходе котла, то вследствие перепада давления в газоходе котла через стены ограждений может возникнуть поток газа или воздуха. Способность газа проникать через пористую стенку называется газопроницаемостью. Количество газов, м³/ч, проникающее через пористую стенку, пропорционально ее площади F , времени t , разности давлений Δp , коэффициенту газопроницаемости k и обратно пропорционально толщине стенки δ :

$$\delta = kF \frac{\Delta p}{\delta} t,$$

Газопроницаемость тем больше, чем больше пористость материала и больше разность давлений. В некоторых случаях газопроницаемость бывает настолько велика, что требуются специальные защитные покрытия ограждений в виде газонепроницаемых обмазок или стальной обшивки для предотвращения проникания воздуха или газов.

Огнеупорными материалами принято считать такие, которые выдерживают длительное воздействие температуры не ниже 1580°С, не расплавляясь и не деформируясь. Для керамических изделий при испытаниях на огнеупорность принимается та температура, при которой полностью деформируется стандартный образец, изготовленный из данного материала. Образец изготавливается в виде правильной усеченной трехгранной пирамиды, имеющей высоту 30 мм и основания с размерами сторон 8 и 2 мм. При высокой температуре в огнеупорном материале одновременно могут быть твердая и жидкая фазы. Поэтому при определении огнеупорности за предельную температуру принимают ту температуру, при которой наступает полное разрушение материала под действием собственной массы. Определение огнеупорности производится путем сравнения специальных эталонных образцов, имеющих определенную температуру плавления, с образцами, изготовленными из заданного материала. Эталонный конус называется «пироскопом» и имеет специальный номер, соответствующий температуре его огнеупорности (ОСТ 1665). Определение огнеупорности производится следующим образом: на под-

ставку из высокоогнеупорного материала устанавливаются конус из испытуемого материала и несколько эталонных пироскопов. Подставка помещается в криптовую печь и нагревается. За образцами ведется визуальное наблюдение. При высоких температурах конус начинает размягчаться, и его вершина под действием собственной массы склоняется к подставке (рис. 3-1). Температура, соответствующая моменту полного склонения вершины конуса, принимается за огнеупорность.

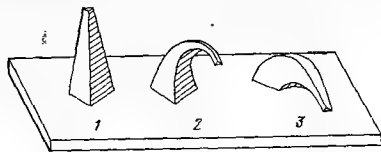


Рис. 3-1. Определение огнеупорности материалов.
1 — исходное состояние образца; 2 — начало размягчения материала; 3 — полное склонение вершины образца.

Эту температуру определяют по номеру упавшего эталонного пироскопа. На рис. 3-1 указано три положения конуса (положение 3 соответствует полному склонению вершины).

Материалы, температура плавления которых не менее 1350°C , но не более 1580°C , называются жаростойкими.

По степени огнестойкости — сопротивлению действия огня — материалы подразделяются на:

1. Огнестойкие или негорючие — не горят и не подвергаются значительной деформации под действием огня (бетон, строительный кирпич и др.). Они обладают способностью выдерживать кратковременно температуру до 1100°C без нарушения структуры и разрушения.

2. Полуогнестойкие — не горят, но в условиях воздействия огня (пламени) подвергаются значительным деформациям (сталь).

3. Полусгораемые материалы, которые благодаря защитным покрытиям или специальной обработке не горят открытым пламенем и не подвергаются быстрому разрушению при действии огня (войлок, пропитанный глиной, и др.).

4. Сгораемые — горящие открытым пламенем (органические материалы).

Приведенные выше основные физико-технические характеристики и показатели являются для всех материалов общими. Наряду с этим огнеупорные и жаростойкие материалы характеризуются еще рядом специфических свойств, которые рассматриваются ниже.

Строительная прочность при высоких температурах

Огнеупорные материалы при высоких температурах начинают размягчаться и деформироваться. Деформация для каждого материала зависит от температуры, нагрузки и времени действия этих факторов. Огнеупорный материал в кладке находится под действием собственной массы и дополнительных нагрузок. Поэтому в каждом случае необходимо знать допустимую нагрузку, при которой деформация материала не будет превышать определенных пределов.

Для определения строительной прочности огнеупорных материалов под нагрузкой при высоких температурах производят испытания цилиндрических образцов, изготовленных из этих материалов, в специальной печи под нагрузкой в 2 кгс/см^2 . В кирпичной кладке обмуровки паровых котлов нагрузка в 2 кгс/см^2 соответствует высоте кладки около 10 м. Обычно же нагрузка от собственной массы обмуровки не превосходит $0,5 \text{ кгс/см}^2$. Для легковесных материалов при испытаниях в качестве нагрузки, кгс/см^2 , принимают массу материала.

Образцы диаметром 36 мм и высотой 50 мм помещаются в криптовую печь, в которой при подъеме температуры и нагревании образца происходит его тепловое расширение. При повышении температуры в материале

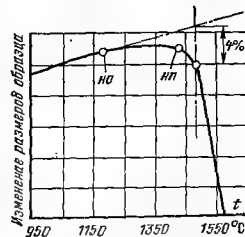


Рис. 3-2. Кривая деформации под нагрузкой.
НО — начало отклонения; МП — начало плавления.

Таблица 3-1

Огнеупорность и прочность строительных материалов

Наименование огнеупорных материалов	Температура, °С			
	Огнеупорность	Начало размягчения	Сжатие, %	
			4	40
Диасовый	1710	1660	—	1670
Полукислый	1710	1400	1430	1500
Шамотный класса ШВ	1610	1250	1320	1500
Шамотный класса ША	1730	1350	1470	1600
Каолиновый 42% Al_2O_3	1750	1450	1550	1650
Муллитовый спекающийся с 70% Al_2O_3	1800	1550	1660	1800
Корундовый спекающийся с 99% Al_2O_3	1850	1870	1900	—
Магнезитовый 90% MgO	2000	1550	—	1580

появляется жидкая фаза, и образец под действием постоянной нагрузки начинает деформироваться. При непрерывном и равномерном нагреве с заданной скоростью регистрируют температуру начала размягчения n_0 , соответствующую сжатию образца на 0,3 мм, и температуры, соответствующие сжатию на 4 и 40%. Кривая деформации образца под нагрузкой приведена на рис. 3-2. Наиболее важное значение для стойкости материала под нагрузкой имеет температура начала размягчения (точка n_0). Однако при оценке строительной прочности под нагрузкой при высоких температурах необходимо учитывать, что действительные условия работы материала значительно отличаются от условий испытания по значению нагрузки, времени нахождения при высокой температуре, действию шлаков и т. д. Кроме того, материал в кладке прогревается неравномерно по толщине, поэтому менее нагретые части материала остаются более твердыми и препятствуют деформации более нагретой части.

В табл. 3-1 приведены данные по огнеупорности и строительной прочности под нагрузкой для некоторых огнеупорных материалов.

Термическая стойкость

Способность огнеупорного материала сопротивляться температурным колебаниям называется термической стойкостью. При резких изменениях температуры в ре-

зультате неравномерного термического расширения отдельных слоев в материале возникают напряжения, приводящие к образованию трещин, разрывов и разрушению материала. Наблюдения показывают, что разрушения имеют место в основном в интервале температур от 300 до 700°С и в большинстве случаев связаны с быстрым прогревом ограждений. Термические напряжения же зависят от разности температур на горячей и холодной сторонах огнеупорного изделия. При температурах более 800—1000°С возникающие в материале температурные напряжения уменьшаются за счет того, что огнеупорный материал приобретает способность к небольшим пластическим деформациям. Обследования футеровок топок и отдельных узлов, выполненных из огнеупорных материалов, показывают, что в большинстве случаев разрушения происходят из-за недостаточной термостойкости применяемых огнеупоров. Термостойкость огнеупорных и жаростойких материалов определяется при испытаниях числом «теплосмен», которые выдерживают изделие из материала до потери 20% своей первоначальной массы за счет откалывания кусочков и выкрашивания. При испытаниях изделие нагревают до 850°С и охлаждают в проточной воде. Для легких изделий термостойкость указывается в воздушных теплосменах, так как при испытаниях материал после нагревания охлаждают в воздухе. Значения термостойкости для основных материалов составляют:

Наименование огнеупорных материалов	Число теплосмен
Диасовый	1—2
Шамотный мелкозернистого состава	5—8
Шамотный крупнозернистого состава	10—12
Каолиновый	15—30
Магнезитовый	2—3
Хромомagneзитовый	2—3
Магнезитохромовый (термостойкий)	Более 30

Шлакоустойчивость

Устойчивость (сопротивляемость) огнеупорного материала воздействию шлаков имеет большое значение. В ряде случаев разрушение футеровки топок и ее отдельных узлов (например, амбразуры горелок) происходит вследствие химического взаимодействия материалов со шлаками. Шлаки и зола при температурах более 900—

1000°C, соприкасаясь с футеровкой, вступают с ее материалом в химическое взаимодействие. Непрерывное воздействие шлаков при высоких температурах на футеровку предопределяет ее износ за счет шлакоразъедания. Интенсивность этого взаимодействия зависит от очень многих факторов, главными из которых являются химическая природа огнеупоров и шлаков, а также их температура. Ошлакованная поверхность огнеупора размягчается и становится менее стойкой к механическим воздействиям. Расплавленные шлаки проникают в поры и трещины огнеупора, вступают с ним в химическое взаимодействие, растворяют его и стекают в виде вновь образовавшихся соединений. На обнажившуюся поверхность попадает новый шлак, и процесс повторяется до разрушения футеровки. Стекающий шлак механически разрушает футеровку. В современных обмуровках разъеданию шлака подвергается в основном футеровка шиповых экранов. Для уменьшения взаимодействия между материалом огнеупоров и шлаков сжигаемого топлива необходимо, чтобы они имели химическое родство. При основных шлаках должны применяться основные огнеупоры, при кислых — кислые. Основность шлаков [3-1] определяется отношением содержания в них основных окислов $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}$ к сумме окислов SiO_2 и Al_2O_3 :

$$Mo = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}.$$

Если $Mo > 1$, то шлаки основные, если $Mo < 1$, то шлаки кислые. Большинство шлаков отечественных топлив, за исключением сланцев и некоторых сибирских углей, являются кислыми. Поэтому для футеровки топочных камер с точки зрения шлакоустойчивости рекомендуется применять полукислые, шамотные и многошамотные изделия, обладающие удовлетворительной стойкостью к воздействию на них кислых шлаков. Химический состав шлаков части топлив приведен в табл. 3-2. Шлакоустойчивость некоторых огнеупорных материалов в зависимости от кислотности или основности шлаков приведена в табл. 3-3.

Для современных мощных котлов характеристики шлаков имеют существенное значение при выборе материалов для футеровки горелочных аппаратов, экранов и выполнения покрытий по шипам. Следует отметить, что

Химический состав шлаков

Происхождение топлива (шлак)	Содержание, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	S	V ₂ O ₅	Прочие	Mo
Подмосковные угли . . .	38—42	37—46	2—14	—	4—7	0,3— 1,0	2—4	—	—	—	0,057—0,091
Уральский бассейн . . .	41—49	11—28	12—30	—	3—23	0,5—3	0,5—6	—	—	—	0,057—0,338
Назаровские угли . . .	35	11,5	10	—	27	3,2	12	12	—	—	0,653
Ирша-бородинские . . .	34	7,2	11	—	34	4,9	9	9	—	—	0,945
Итатские	33	12,5	12	—	23	2,5	16	16	—	—	0,560
Ангренские	34	20	9,0	—	17	2,0	14	—	—	—	0,352
Донецкие антрацит и штыб	47—55	19—28	5,5— 2,1	—	3—8,3	0,6— 1,9	0,5— 2,6	—	—	—	0,0545—0,123
Каменные угли . . .	30—55	15—40	5—35	0—35	3—20	0—5	—	—	—	0—5	0,067—0,57
Бурые угли	20—60	10—30	10—30	0—30	5—40	0—10	—	—	—	0—15	0,167—0,890
Горючие сланцы . . .	20—50	10—20	5—10	—	15—40	0—4	—	—	—	0—2	0,50—0,63
Торф	20—50	10—30	5—30	0—30	5—40	0—10	—	—	—	0—10	0,167—1,0
Мазут	5—8	2—7	1—5	—	5—10	30—40	До 1,0	2—3,5	До 0,10	30—40	5,0—3,34

Примечания: 1. Таблица составлена по средним данным анализов шлаков различных топлив.
2. Для топочного мазута в графе «прочие» указана сумма K₂O+Na₂O.

Таблица 3-8

Шлакоустойчивость огнеупорных материалов

Огнеупорные материалы	Химическая устойчивость к шлакам	
	основным	кислым
Шамот	Плохая	Удовлетворительная
Высокоглиноземистый	Удовлетворительная	Отличная
Муилит	Отличная	»
Динас	Плохая	»
Магнезит	Отличная	Плохая
Хромомagneзит	»	Удовлетворительная
Карборунд	Низкая	Хорошая

шлаки жидких топлив (мазута), хотя их количество невелико, являются более агрессивными по сравнению с шлаками углей и имеют основной характер.

Объем материала при высоких температурах

Длительная работа огнеупора при высоких температурах вызывает изменение его объема вследствие фазового изменения его состава, перекристаллизации и дополнительного спекания. Может происходить дополнительная усадка или рост объема материала. Большинство огнеупорных изделий дает усадку в результате дополнительного спекания. Увеличивают объем лишь некоторые материалы, например динас. Дополнительные усадки или рост объема вызываются неполным завершением всех процессов фазового изменения и усадки материалов в процессе его обжига. Дополнительная усадка обмуровки ведет к раскрытию ее швов и преждевременному разрушению. Значительная усадка швов особенно недопустима в кладке амбразур горелок и на неэкранированных участках перекрытий в виде сводов и прочих узлов. Значение допускаемой усадки не должно превышать 0,5—1 % начальных линейных размеров.

Для амбразур горелок и сводов для уменьшения усадки отдельных фасонных изделий применяют материалы более высокого качества. Кладку выполняют с минимально допустимой толщиной швов от 1 до 2 мм.

Термическое расширение

Огнеупорные материалы при нагревании расширяются и после охлаждения занимают первоначальный объем. Это расширение отличается от увеличения или уменьшения объема, происходящих в результате фазового изменения состава материала или его усадки. От термического расширения зависят напряжения, возникающие в огнеупоре при быстрых нагреваниях и охлаждениях, т. е. термическая стойкость огнеупора. Значение термического расширения, %, равно $\Delta l = \alpha_{\text{ср}} t \cdot 100$, где $\alpha_{\text{ср}}$ — средний коэффициент термического расширения материала при нагреве в интервале температур от 0 до t , °C, 1/°C; t — конечная температура нагрева, °C. Например, для шамотных изделий $\alpha_{\text{ср}} = 5,5 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, тогда термическое расширение при нагревании до 1000°С составит:

$$\Delta l = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 100 = 0,55 \%$$

Значения коэффициентов линейного расширения α для некоторых материалов в интервале температур от 0 до 1000°С, применяемых в обмуровке, составляют:

Огнеупорные материалы	$\alpha \cdot 10^6$, 1/°C
Шамот	4,6—5,0
Полукислый	7,0—9,0
Динас	11,5—13,0
Каолин	4,5—5,5
Муилит (70% Al_2O_3)	5,5—5,8
Корунд (99% Al_2O_3)	8,0—8,5
Магнезит (90—92% MgO)	14—15,0
Хромит	9,0—11,0
Карборунд	4,7

3-2. ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Все материалы, применяемые в ограждениях котлов, можно условно разделить на следующие группы:

- 1) огнеупорные и жаростойкие — бетоны;
- 2) специальные — набивные огнеупорные массы;
- 3) теплоизоляционные;
- 4) покровные;

5) металлические — для крепления обмуровки и изоляции.

Огнеупорные материалы по ГОСТ 4069-69 классифицируются по огнеупорности, химическому составу, по пористости и другим свойствам. По огнеупорности материалы делятся на три группы:

- 1) огнеупорные (от 1580 до 1770°C включительно);
- 2) высокоогнеупорные (от 1770 до 2000°C включительно);

3) высшей огнеупорности (более 2000°C).

Огнеупорные изделия по ГОСТ 4385-68 классифицируются в зависимости от содержания в них химических соединений, которыми определяются их свойства. Ниже приводятся только два класса изделий и их группы, которые являются основными в практике обмуровки паровых котлов и печей:

1. Кремнеземистые (содержание $\text{SiO}_2 \geq 80\%$; применяются только для металлургических печей).

2. Алумосиликатные — разделяются по содержанию Al_2O_3 , %, на следующие группы:

- а) полукислые ($\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 28, 65 \leq \text{SiO}_2 \leq 80$);
- б) шамотные ($28 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 45$);
- в) муллитокремнеземистые ($45 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 62$);
- г) муллитовые ($62 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 90$);
- д) муллитокорундовые ($72 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 90$);
- е) корундовые ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 90$).

Помимо этих классов, в ГОСТ 4385-68 имеются классы и группы: магнезиальные, углеродистые, карбидокремневые, дириконные; всего ГОСТ содержит 11 классификаций.

Основными материалами для обмуровки котлов являются шамотные. В последнее время для футеровки горелочных аппаратов рекомендуют муллитовые изделия, а для шпильных покрытий экранов — массы, изготавливаемые на базе карбидокремния и корунда на фосфатных связках. Полукислые изделия вследствие их меньшей термической стойкости применять рекомендуется только в крайних случаях для замены шамотных и для небольших котлов.

В зависимости от открытой пористости, %, изделия классифицируются на:

Особо плотные	3
Высокоплотные	3—10
Плотные	10—16

Продолжение

Уплотненные	16—20
Обычные	20—24
I подгруппа	20—24
II подгруппа	24—30
Легковесные	45—85
Ультралегковесные	85

Для легковесных и ультралегковесных изделий указана общая пористость.

По ГОСТ 4385-68 дается также классификация по способу прессования изделий.

Алумосиликатные изделия (полукислые, шамотные, каолиновые и высокоглиноземистые) получили наиболее широкое распространение при обмуровке котлов.

Полукислые огнеупоры изготавливаются из измельченных кварцевых пород на связке из огнеупорной глины или каолина.

Шамотные огнеупоры изготавливаются из смеси огнеупорных глин и шамота (шамотом называется обожженная огнеупорная глина).

Многошамотными огнеупорами обычно называют материалы, которые содержат от 80 до 85% шамота и 20—15% огнеупорной глины.

Каолиновые изделия (обоженный глинозем) относятся к группе шамотных. Из-за повышенного содержания Al_2O_3 (более 39%) каолиновые огнеупоры являются переходными от огнеупорных к высокоогнеупорным материалам; их огнеупорность колеблется от 1740 до 1750°C. В отличие от шамотных каолиновые огнеупоры обладают повышенной термостойкостью и отличной устойчивостью по отношению к кислым шлакам.

Изделия огнеупорные шамотные общего назначения по ГОСТ 390-69 в зависимости от их огнеупорности, °C, подразделяются на марки:

ША	≥ 1730
ШБ	≥ 1670
ШВ	≥ 1580
ШУС	≥ 1580

Марка ШУС применяется для тепловых агрегатов с умеренными температурами. Содержание глинозема Al_2O_3 в указанных марках должно быть не менее 28%. Допуски по размерам изделий различных марок даны в табл. 3-4.

Таблица 3-4

Допуски размеров изделий, мм

Изделия	Мерки изделий			
	ША	ШВ	ШВ	ШУС
Прямые и клинковые	±4	±4	±5	±6
По длине	±2	±2	±3	±4
По ширине	±2	±2	±3	±3
Для фасовок:				
до 100 мм	±2	±2	±2	—
от 100 до 400 мм	±2	±2	±2	—

В число технических требований по ГОСТ 390-69 включены допуски на отбитость углов, размеры трещин и пр. В табл. 3-5 приведена классификация по ГОСТ 8691-73 изделий общего назначения.

Легковесные изделия применяются в ограждениях только в тех местах, где они не подвергаются механическим воздействиям (удару, истиранию), а также не соприкасаются с жидкими шлаками. В большинстве случаев они используются в качестве высокотемпературной изоляции.

Легковесные изделия с массой менее 1 г/см³ относятся к группе ультралегковесных. Ультралегковесные материалы применяются при температурах не более 1250°C, а при объемной массе примерно 0,4 г/см³ не более 1150°C. Легковесные огнеупоры изготавливаются из шамотных и каолиновых порошков, которые смешиваются с выгорающими добавками или пенообразующими веществами. При изготовлении обычные легковесные изделия перед обжигом формируются в заготовки, а после обжига из них выпиливаются и шлифуются для получения необходимых размеров изделия.

Бетоны состоят из заполнителя и связующего вещества, которые имеют свои специфические составы и свойства. Для огнеупорных и жаростойких бетонов в настоящее время разработаны два государственных стандарта, которые определяют их классификацию. ГОСТ 19038-73 распространяется только на бетоны с огнеупорностью более 1580°C. Их классификация приведена ниже.

Помимо уже приведенных типов, указанных в ГОСТ, имеются бетоны корундосодержащие, магнезиальные,

Таблица 3-5

Маркировка деталей общего назначения по ГОСТ 8691-73

Марка	Наименование изделий	Какая-либо плотность, г/см ³	Марка	Наименование изделий	Какая-либо плотность, г/см ³
ША-I	Шамотные	2,1	ШВ-0,9	Шамотные легковесные	0,9
ША-II	»	2,0	ШВ-0,8	То же	0,8
ШВ-I	»	2,0	ШВ-0,6	»	0,6
ШВ-II	»	1,9	ШВ-0,4	»	0,4
ШВ	»	1,9	КЛ-I,3	Каолиновые легковесные	1,3
ШУС	»	1,9	КЛ-0,9	То же	0,9
П	Полукислые	1,9	ВГЛ-I,4	Высокоглиноземистые легковесные	1,4
ШЛА-I,3	Шамотные легковесные	1,3	ВГЛ-I,3	То же	1,3
ШВ-I,3	То же	1,3	ВГЛ-I,0	»	1,0
ШВ-I	»	1,0			

магнезиально-известковые, углеродистые, карбидокремнистые с содержанием SiC > 90%, цирконистые и др.

Основное применение, как уже упоминалось, в обмуровке котлов имеют алюмосиликатные бетоны шамотной группы с содержанием Al₂O₃ более 28%. Алюмосиликатные бетоны по значению открытой пористости, %, подразделяются на следующие сорта:

Повышенной плотности	<16
Плотные	16—20
Обычной плотности	20—30
Появляющейся плотности	30—45
Низкой плотности	45—85

В зависимости от максимальной температуры применения они подразделяются на группы:

Группа	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Температура, °C	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	>1700

По ГОСТ 19038-73 бетоны классифицируют также по способу укладки: литые, вибрированные, трамбованные, прессованные и торкретные.

Жаростойкие бетоны с огнеупорностью менее 1580°C применяются согласно ГОСТ 20190-75 при рабочей тем-

Состав мертелей

Наименование компонента	Марки	
	ВТ1; ВТ2; ШТ-1; ШТ-2; ПТ-1	ШК1; ШК2; ШК3; ПК1; ПК2
Отощитель	80—85	78—84
Пластичная огнеупорная глина	20—15	22—16

Примечания: 1. При отсутствии готового мертеля такой может быть изготовлен из бывшего в употреблении шамотного кирпича, очищенного от шлама и размоленного в виде песка для тонкого мертеля с зернами не более 1 мм и для крупного помола с зернами не более 2 мм. Более подробно зерновой состав мертелей указан в ГОСТ 6137-61. Огнеупорная пластичная глина должна быть тщательно размолена и просеяна. Песок и глина перемешиваются в сухом виде в пропорциях, указанных выше.

2. Полукислый мертель может применяться только для кладки из полукислых изделий.

температуре не ниже 200°C. Эти бетоны классифицируются по предельной температуре их применения, по объемной массе, по структуре, по прочности и в зависимости от вида вяжущего. Классификация по предельной температуре следующая:

Классы бетонов	3	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Предельно допустимая температура, °C	300	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400

По объемной массе, кг/м³, бетоны различают:

Особо тяжелые	>2500
Тяжелые	2000—2500
Облегченные	1800—2200
Легкие	500—1800
Особо легкие	<500

В зависимости от вида вяжущего вещества бетоны делят на бетоны на гидравлическом вяжущем веществе (цементе); бетоны на воздушном вяжущем веществе (жидком стекле); бетоны на химическом вяжущем веществе (силикат-глибе, фосфате и др.).

Кроме того, бетонам присваиваются марки: М50, ..., М250, ..., М500.

Составы для приготовления огнеупорных и жаростойких бетонов, применяемых в обмуровке котлов, приведены в приложении 5.

3-3. ОГНЕУПОРНЫЕ РАСТВОРЫ

Кладка всевозможных изделий, как огнеупорных, так и изоляционных, производится на специальных растворах. Назначение растворов состоит в том, чтобы связать между собой отдельные кирпичи и фасоны для образования монолитной кладки без пустот. Кладка на растворе приобретает особое значение для огнеупорных изделий. При наличии пустот не обеспечиваются монолитность и устойчивость кладки, возникает опасность проникновения на значительную глубину газов и шлаков, ускоряющих разрушение футеровки. Растворы для огнеупорной кладки называются «мертелями». Мертель состоит из огнеупорного зернистого порошка и связующего вещества, которые при затворении (смачивании и разведении) водой образуют раствор, скрепляющий отдельные кирпичи или изделия при высыхании на воздухе, при нагревании и спекании.

Состав мертеля должен соответствовать составу огнеупоров, из которых выполняется кладка. Так, для шамотной и каолиновой кладок должен применяться шамотный мертель. Мертели обычно применяют готовые, состоящие из смеси шамотного порошка (80—85%) и огнеупорной глины (15—20%). В зависимости от размеров зерен шамота они делятся на мертели грубого и тонкого помола. Зернистость шамота зависит от толщины швов выполняемой кладки в футеровке точных пространств. Мертели с зернистостью менее 1 мм относятся к мертелям тонкого помола. Швы в огнеупорной кладке благодаря усушке и нагреванию дают усадку около 15%. Так, например, на каждый метр высоты кладки в зависимости от толщины швов образуется усадка.

Толщина шва, мм	2	3	4	5
Усадка, мм	4,5	6,7	9,0	10,5

Из этих данных видно, что во избежание появления трещин в кладке швы необходимо выполнять возможно тонкими.

Для кладки обмуровки применяются готовые огнеупорные алюмосиликатные мертели по ГОСТ 6137-61. Согласно этому ГОСТ в зависимости от химического и зернового состава мертели делятся на следующие марки: ВТ1, ВТ2 — высокоглинозистые тонкого помола; ШТ1, ШТ2 — шамотные тонкого помола; ПТ1 — полукислые

Таблица 3-7

Огнеупорность мертелей и содержание в них $Al_2O_3 + TiO_2$

Наименование показателя	Марки мертелей						
	Высокоглини- земистые		Шамотные			Полукислые	
	ВТ1	ВТ2	ШТ1 ШК1	ШТ2 ШК2	ШК3	ПК1 ПК2	ПК2
Огнеупорность, °С	1800	1750	1730	1690	1650	1650	1610
Содержание $Al_2O_3 + TiO_2$, %, не менее	60	45	38	33	30	20	20

тонкого помола; ШК1, ШК2, ШК3 — шамотные крупно-го помола и ПК1, ПК2 — полукислые крупного помола. Состав мертелей, %, по массе приведен в табл. 3-6.

Огнеупорность мертелей и содержание в них $Al_2O_3 + TiO_2$ должны соответствовать в зависимости от их марок данным табл. 3-7.

3-4. ОГНЕУПОРНЫЕ И ЖАРОСТОЙКИЕ БЕТОНЫ

Широкое распространение жаростойких бетонов для обмуровки топочных камер и газоходов мощных котлов позволило в большинстве случаев избавиться от кирпичной кладки и дорогостоящих фасонных огнеупоров. Применение бетонов значительно снизило стоимость монолитных блоков, изготовляемых одновременно, трудозатраты и сроки выполнения работ. Для ограждений современных мощных котлов с высокой степенью экранирования огнеупорность и жаростойкость шамотобетонов оказались вполне достаточными для длительной эксплуатации. Ввиду особой важности бетонов как основных материалов для ограждений целесообразно остановиться на них более подробно. Бетонами называются камнеподобные массы, которые состоят из смеси так называемых заполнителей из щебенки и песка с вяжущими веществами. Крупным заполнителем является щебенка, изготавливаемая дроблением основного огнеупорного материала, входящего в состав бетона, до размера фракций от 10 до 25 мм, а мелким — щебенка в виде песка из того же материала с размером фракций до 5 мм. При затворении

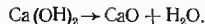
водой смеси определенного весового состава из заполнителей с цементом или другим гидравлическим вяжущим масса схватывается и постепенно твердеет, превращаясь в монолит. Форма опалубки, в которую масса предварительно укладывается, определяет требуемую конструкцию изделия. Скорость отверждения зависит от вяжущего вещества и температуры. Наибольшее распространение для ограждений котлов получили шамотобетоны, состоящие из шамотных заполнителей и цемента в качестве вяжущего вещества. Шамотобетоны на обычных цементовязущих веществах являются жаростойкими, так как их огнеупорность менее 1580°C, а рабочая температура не превышает 1100—1300°C. В качестве вяжущего вещества применяются цементы глиноземистый и портландский. Соответственно этим вяжущим бетоны называют «шамотобетон на глиноземистом цементе» и «шамотобетон на портландцементе».

Бетон на портландцементе

Портландцемент имеет в своем составе от 40 до 50% трехкальциевого силиката $3CaOSiO_2$, который является основным вяжущим. Реакция гидратации происходит с выделением свободной окиси кальция (CaO):



Остальные компоненты при твердении свободного гидрата извести не выделяют. В дальнейшем при нагревании происходит потеря воды гидратом окиси кальция:



При остывании бетона на его поверхности снова происходит гидратация окиси кальция за счет поглощения влаги из воздуха. Так как извест CaO при гидратации резко увеличивает свой объем (до 2,5 раз), то происходит растрескивание и разрушение бетона. Внутри бетона при образовании CaO из гидрата $Ca(OH)_2$ происходит испарение воды, усадка цементного камня, в результате чего появляются трещины и разрывы. Эти процессы в бетоне происходят при сравнительно низких температурах — в пределах 550°C. Таким образом, применение шамотобетонов на портландцементах без особых мероприятий — введения в их состав специальных компонентов, устраняющих описанные процессы, исключается. Для

предотвращения образования свободной извести СаО при нагревании бетона предложен способ связывания ее в твердой фазе. Для этого в состав бетона вводится тонкомолотая добавка из кремнезема или шамота, вследствие чего при нагревании происходит связывание СаО в конечное соединение CaSiO_2 . В интервале температур от 500 до 800°C реакция идет медленно, при температуре более 800°C скорость реакции возрастает. Для обеспечения этих реакций в твердой фазе тонкость помола добавки должна соответствовать тонкости помола цемента, т. е. быть не более 40—60 мкм. Минимальное количество добавки практически должно составлять не менее 30% массы цемента. Шамотобетоны на портландцементе с тонкомолотой добавкой уступают бетонам на глиноземистом цементе: максимальная рабочая температура их применения не должна превышать 1100°C.

Уральским филиалом ВТИ предложен состав шамотобетона на портландцементе с введением в него 3—5% триполифосфата натрия ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) взамен тонкомолотой добавки. При наличии в составе бетона триполифосфата натрия в нем происходят химические реакции, связывающие свободную известь. Разработано два состава бетонов, которые называются ПФБТ — тяжелый бетон с объемной массой 1,8 т/м³ и ПФБЛ — легкий с объемной массой 1,3 т/м³. Легкий бетон, помимо шамотного заполнителя, имеет в своем составе около 10—12% асбеста. Наибольшая рабочая температура применения обоих бетонов не более 1200°C. Бетоны ПФБ удобны при приготовлении и в укладке.

Бетон на глиноземистом цементе

По химическому составу глиноземистый цемент отличается от портландского высоким содержанием глинозема Al_2O_3 и малым содержанием окиси кальция СаО. Основной вяжущей частью является однокальциевый алюминат $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, второстепенной — двухкальциевый силикат $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, при затворении происходит следующая реакция:



В глиноземистом цементе не содержится трехкальциевый силикат, поэтому свободная известь почти не выделяется, и он не имеет недостатков бетона на портландцементе. Жаростойкий шамотобетон на глиноземистом цементе для своего приготовления не требует вводить в его состав каких-либо дополнительных компонентов. Такой бетон удобен в работе, быстро затвердевает и применяется при температурах до 1300°C. При нагревании от 300°C его прочность почти не меняется, в интервале от 400 до 600°C прочность составляет 50% прочности при 110°C, которая принимается за 100%, при температуре более 900°C прочность бетона увеличивается. Снижение прочности до 50% в процессе нагревания не исключает его применения в обмуровке ограждений, так как при нормальной прочности бетона 100—110 кгс/см² даже сниженная на 50% прочность оказывается достаточной. Кроме того, шамотобетон на глиноземистом цементе имеет более удовлетворительную структуру. Поэтому при сушке и первом разогреве бетона не возникает трещин и разрывов в обмуровке, которые часто имеют место у бетонов на портландцементе (см. гл. 12). Шамотобетон на глиноземистом цементе применяется с 1950 г. и зарекомендовал себя наилучшим образом, особенно при ремонтных работах, когда требуются быстрое затвердение и нарастание прочности. Практически уже через сутки его прочность достигает примерно 70% конечной и позволяет укладывать на него последующие слои других материалов. Эти свойства шамотобетона на глиноземистом цементе позволяют его рекомендовать как вполне проверенный и надежный жаростойкий материал.

Бетон на шлакопортландцементе

К группе шамотобетонов на портландцементе относятся бетоны на шлакопортландцементе. Эти бетоны обладают низким качеством и применяются при температуре до 600—700°C. Несмотря на недостатки, шамотобетоны на шлакопортландцементах иногда находят применение при низких рабочих температурах, однако этого следует избегать.

Бетон на жидком стекле

Бетоны на жидком стекле имеют в своем составе шатный заполнитель и в качестве вяжущего жидкое натриевое стекло Na_2SiO_3 . Максимальная рабочая температура

тура применения для бетона на жидком стекле составляет примерно 900°C. Установлено, что затвердевание бетона на жидком стекле по всему массиву происходит только в присутствии кремнефтористого натрия Na_2SiF_6 . Оптимальное количество кремнефтористого натрия должно составлять около 12% массы жидкого стекла. Для обеспечения затвердевания бетона на жидком стекле необходима точная дозировка Na_2SiF_6 по всей массе, а сам кремнефтористый натрий должен быть качественно чистым.

Затвердевание бетона происходит только в теплой воздушно-сухой атмосфере. Оптимальной температурой затвердевания является температура 30–40°C. Необходимые условия затвердевания для бетона на жидком стекле на монтажных площадках обеспечить не всегда возможно, по этим причинам применение таких бетонов в ограждениях котлов не получило распространения. Преимуществом бетона на жидком стекле является повышение его прочности с увеличением температуры.

Высокотемпературные бетоны

В связи с необходимостью применения жаростойких бетонов для рабочих температур выше 1300°C, например для футеровки горелочных амбразур, предложены и разработаны новые составы бетонов, которые проходят промышленное освоение. Такими бетонами являются:

1. Высокотемпературный бетон для применения при рабочих температурах до 1400°C с шамотным заполнителем на связке с ортофосфорной кислотой.

2. Бетон для рабочей температуры до 1500°C с высокоглиноземистым заполнителем и цементом.

3. Хромомагнетитовый бетон для рабочей температуры до 1600°C со связкой на жидком стекле с добавлением кремнефтористого натрия. Этот бетон устойчив по отношению к шлакам, содержащим в избытке основные окислы.

При выборе этих бетонов следует иметь в виду дефицитность высокоглиноземистого цемента и таких же заполнителей. При назначении рецептуры (состава) этих бетонов и технологии выполнения из них футеровки необходимо в каждом случае получать указания от специализированных организаций (НИИЖБ, ОРГЭЭС и др.).

3.5. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Применяемые теплоизоляционные материалы в соответствии с ГОСТ 16381-70 классифицируются по следующим признакам:

исходному сырью — неорганические и органические; структуре — пористо-волокнистые и пористо-зернистые;

форме — штучные, рулонные, шнуровые, сыпучие; объемной массе — ОЛ (особо легкие, $\gamma = 15 \div 100 \text{ кг/м}^3$); Л — (легкие, $\gamma = 125 \div 350 \text{ кг/м}^3$); Т (тяжелые, $\gamma = 400 \div 600 \text{ кг/м}^3$).

По относительной деформации сжатия под действием нагрузки 0,02 кгс/см² материалы делят на:

М — мягкие (деформация более 30%);

ПЖ — полужесткие (деформация 6–30%);

Ж — жесткие (деформация до 6%).

Теплоизоляционные материалы классифицируются также по теплопроводности (табл. 3-8).

В конструкциях ограждений котлов применяются только неорганические материалы, преимущественно легкие и тяжелые с малой, средней и повышенной теплопроводностью. Количество неорганических теплоизоляционных материалов достаточно велико, однако широкое распространение в практике проектирования и выполнения изоляции ограждений котлов получили сравнительно небольшая номенклатура материалов. Ограничение номенклатуры вызвано целым рядом технических и экономических соображений. Прежде всего материалы должны быть недефицитными и вырабатываться отечественной промышленностью в достаточном количестве.

Таблица 3-8

Теплопроводность теплоизоляционных материалов и их классификация

Классификация по теплопроводности	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°C), при средней температуре, °C, не более		
	25	125	300
А — малотеплопроводные	0,05	0,07	0,11
Б — среднетеплопроводные	0,1	0,12	0,16
В — повышенной теплопроводности	0,15	0,18	0,23

Применение таких материалов должно быть экономически оправданным, выполнение из них различных узлов должно быть технологичным, должно допускать механизацию процессов и сокращать время изготовления. Материалы должны быть взаимозаменяемы и должны допускать их применение в узлах различных по конструкции котлов. Последнее требует, чтобы изоляционные материалы имели близкие свойства и физико-технические характеристики — коэффициенты теплопроводности, объемные массы и рабочую температуру применения. Ниже приводятся только те материалы, которые получили широкое распространение в ограждениях, экономичны и технически целесообразны. Полное описание материалов, применяемых для изоляции, приводится в справочнике по специальным работам [3-2]. Физико-технические характеристики, необходимые для расчетов при проектировании изоляции, приведены в приложении 3.

Асбест и изделия на его основе

Асбест хризотилитовый (ГОСТ 12871-67) из отечественных месторождений является минералом с плотностью 2,4—2,6 г/см³, способным выдерживать длительную температуру при нагреве до 500°C. Асбест может расщепляться на тонкие волокна (иголки) и в виде массы с перепутанными и деформированными волокнами называется распушенным. В зависимости от длины волокон и наличия пыли асбест делится на восемь сортов: от 0 до 7-го сорта. Наиболее ценные сорта — имеющие более длинные волокна, наименее ценным является 7-й сорт, который содержит больше всего пылевидных частиц и самые короткие волокна. Распушенный асбест имеет теплопроводность от 0,08 до 0,23 ккал/(м·ч·°C) в зависимости от его объемной массы и применяется для изготовления асбестовых изделий в виде бумаги, картона, шнура и в качестве заполнителя при приготовлении специальных жаростойких бетонов и изоляционных масс. В чистом виде применяется редко в качестве изоляционного заполнителя в некоторых узлах ограждений.

Бумага асбестовая теплоизоляционная (ГОСТ 2630-69) изготавливается в виде листов 1000×950 мм толщиной от 0,5 до 1,5 мм и в виде рулонов шириной до 1150 мм. Бумага изготавливается двух сортов и выдерживает температуру до 500°C.

Асбестовый картон (ГОСТ 2850-75) с объемной массой 1000—1300 кг/м³ изготавливается в виде листов 900××900 мм и 1000×1000 мм с толщиной от 2 до 10 мм и выдерживает температуру до 600°C.

Шнур асбестовый (ГОСТ 1779-72) изготавливается трех типов: асбестовый, асбомагнезиальный и асбопхшнур, из асбестовых нитей, пряжи или волокон с оплеткой или без нее. Асбестовый и асбопхшнур применяется для изоляции поверхностей с температурой не более 300°C. Асбомагнезиальный шнур для изоляции поверхностей с температурой до 400°C. Шнуры подбираются по ГОСТ, в котором указаны диаметр, мм, и масса 1 м длины шнура. За рубежом, помимо хризотилового асбеста, для приготовления некоторых изоляционных масс применяется «амфиболовый асбест», который носит название голубого или синего; качество этого асбеста выше хризотилового, а рабочая температура достигает 600°C.

Минеральная вата и изделия на ее основе

Минеральная вата (ГОСТ 4640-76) является наиболее распространенным и дешевым материалом для изоляции и основой для изготовления теплоизоляционных изделий. Волокна минеральной ваты получают из расплава горных пород. Существует несколько способов изготовления минеральной ваты. Наиболее распространен способ, при котором струя расплава раздувается паровой форсункой, расплав вытягивается в волокна через специальные платиновые фильеры. Качество фильерной ваты (ВФ) выше качества ваты, изготавливаемой путем раздувки расплава. Объясняется это тем, что при раздувке расплава по воздуху летят маленькие капли, которые вытягиваются в волокна и оседают в специальной камере. В процессе вытяжки капли на конце волокна остаются маленьким шариком, который отламывается от волокна и оседает в камере. Эти шарики называются «королевками»; их наличие ухудшает изоляционные свойства минеральной ваты. Особенно это сказывается при вибрации поверхности, поскольку в этом случае королевки пробивают толщу слоя ваты и оседают в нижней части. В вате образуются пустоты, нарушается однородность структуры слоя и ухудшаются изоляционные свойства. Отрицательное влияние королевков уменьшается в минераловатных изделиях на специальных связках.

Минеральная вата изготавливается четырех марок: 75; 100; 125 и 150. Цифровое обозначение марок соответствует объемной массе, кг/м^3 , под действием удельной нагрузки в $0,02 \text{ кг/см}^2$. Предельная температура применения минеральной ваты 600°C . Из минеральной ваты изготовляют плиты, цилиндры и полужесткие. В качестве связующих добавок применяются битум, синтетические и неорганические вещества. Изделия на битумном связующем пригодны для рабочих температур, не превышающих 200°C , на синтетических — не более 300 — 400°C и на неорганических — не более 500°C . Для ограждений энергетических котлов применяются плиты и прошивные маты или матрицы, рабочая температура применения которых не менее 400°C .

Плиты и маты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем (ГОСТ 9573-72) изготовляются для работы при температуре до 400°C . Размеры изделий, которые применяются в ограждениях, таковы: длина 1000 мм, ширина 500 и 1000 мм, толщина от 40 до 100 мм с интервалом в 10 мм. Применяемые изделия выполняются обычно в виде полужестких и жестких плит: полужесткие имеют объемную массу 100 — 125 кг/м^3 , жесткие до 150 кг/м^3 ; коэффициент теплопроводности изделий при средней температуре примерно 125°C составляет около $0,065 \text{ ккал/(м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C)}$.

Плиты из минеральной ваты температуростойкие (ТУ № 5 ГКЭ и Э СССР) чаще всего применяются для изоляции промышленного оборудования и в ограждениях котлов. Плиты изготавливаются с размерами 500×500 и 500×1000 мм при толщине 50 мм с допусками по длине и ширине ± 10 мм, по толщине ± 5 мм. В зависимости от объемной массы и рабочей температуры плиты имеют две марки: 300 и 350. Коэффициент теплопроводности плиты при средней температуре 270°C лежит в пределах от 0,11 до $0,12 \text{ ккал/(м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C)}$.

Плиты полужесткие из минеральной ваты на крахмальной связке (ТУ 81-65 Главмоспромстройматериалы) могут применяться при температуре до 400°C . Они изготавливаются различных размеров в зависимости от объемной массы марок 125, 150 и 200. По заказу потребителя могут изготавливаться с объемной массой до 250 кг/м^3 толщиной 50—60 мм с уплотнением не более 10% под нагрузкой $0,02 \text{ кг/см}^2$.

Пухшнур из минеральной ваты (ТУ 36-887-67) изготавливается в виде жгутов диаметром 20, 35 и 60 мм с оплеткой из оцинкованной проволоки, скрученной стеклянной нити, в хлопчатобумажной и других оплетках. В ограждениях котлов шнур в металлической оплетке применяется только при температуре до 600°C , а из стеклянных нитей — до 400°C . Марки шнура 200, 250 и 300 соответствуют его объемной массе, кг/м^3 . Коэффициент теплопроводности шнура при 25°C составляет около $0,06 \text{ ккал/(м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C)}$.

Маты минераловатные прошивные (ГОСТ 21880-76) изготовляются с обкладкой с одной или с двух сторон. Максимальная температура применения матов зависит от материала обкладки и составляет:

Материал обкладки	Температура, $^\circ\text{C}$
Металлическая сетка	600
Асбестовая ткань АТ-7	450
Ткань или сетка из стекла	400
Асбестовая ткань АТ-1	250

Маты выпускают следующих размеров:

Размеры мата, мм	Допуск, мм
Длина	1000 — 2500 ± 50
Ширина	500 — 2000 ± 20
Толщина	40 — 100 ± 5

Объемная масса зависит от марки мата. Для марок 100 и 150 объемная масса, кг/м^3 , составляет соответственно 75—100, 126—150. Коэффициент теплопроводности при средней температуре 100°C лежит в пределах от 0,038 до $0,043 \text{ ккал/(м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C)}$.

Минераловатные матрацы изготавливаются обычно ручным способом любой формы, толщиной от 50 до 150 мм. При изготовлении вату уплотняют до половины своей первоначальной толщины, обкладывают металлической сеткой и прошивают проволокой. Так как минераловатные матрацы изготавливаются более плотными, чем прошивные маты, то их коэффициент теплопроводности соответственно выше. При средней температуре 250°C он составляет $0,14$ — $0,15 \text{ ккал/(м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C)}$ для матраца с объемной массой 300 кг/м^3 .

Стеклоплатная вата и теплоизоляционные изделия из нее

Вата получается из расплава специально приготовленной смеси из неорганических веществ. Волокна получают путем раздува расплава или обработкой в центрифуге. Различают два вида стекловатного волокна: штапельное длиной от нескольких миллиметров до 2 м и непрерывное. Для теплоизоляции обычно используется штапельное волокно. Стеклоплатная вата ВТУ 11-54 состоит из перепутанных волокон с объемной массой не более 150 кг/м^3 и коэффициентом теплопроводности около $0,05 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C)}$ при температуре 100°C . Вату применяют обычно в качестве материала для изготовления теплоизоляционных изделий. Маты и полосы объемной массой не более 170 кг/м^3 применяют для рабочих температур не более $400\text{--}450^\circ\text{C}$. Стеклоплатное полотно (ткань) применяется для оклейки и уплотнения поверхностей ограждений (уменьшения газопроницаемости) и в качестве отделочного слоя. Вата каолинового состава (МРТУ 6-11-102-69) может применяться для изоляции поверхностей с температурой до 1100°C . Она выпускается в ограниченном количестве и очень дефицитна. Применение каолиновой ваты и изделий из нее в ограждениях котлов распространения не получило.

Диатомит и изделия из него

Различают диатомит — сырье и диатомитовые обожженные изделия. Диатомит (трепел) — осадочная порода, состоящая в основном из кремнезема, применяется для изготовления теплоизоляционных материалов. Объемная масса в сухом состоянии не более 800 кг/м^3 . Обожженный диатомит — диатомовая крошка в виде зерен крупностью до 12 мм применяется для засыпной изоляции и в качестве заполнителя при приготовлении жаростойких термоизоляционных бетонов и растворов. Крошка выпускается с объемной массой 500 и 600 кг/м^3 двух марок: 500 и 600.

Изделия диатомовые обожженные (ГОСТ 2695-71) производятся из смеси диатомита (трепела) с выгорающими или порообразующими веществами. После формовки и сушки изделий производится их обжиг. Изделия выпускаются в виде кирпичей стандартных размеров, блоков, полуцилиндров и сегментов для изоляции трубопроводов. Наибольшая температура применения диатомо-

вых изделий 900°C . Теплопроводность диатомовых изделий при средней температуре 350°C колеблется от $0,11$ до $0,23 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C)}$, а предел прочности на сжатие — от 6 до 10 кгс/см^2 . В зависимости от объемной массы и технологии производства изделия выпускаются следующих марок: пенодиатомовые ПД-350; ПД-400; диатомовые Д-500, Д-600 и трепельные Т-600 и Т-700. Номер марки примерно соответствует объемной массе изделий, кг/см^3 . Для изоляции в ограждениях котлов применяются изделия марок Д-500 и Д-600.

Известково-кремнеземистые изделия

Известково-кремнеземистые изделия (МРТУ 34-48-4601-77 МЭ и Э СССР) изготавливают из смеси извести, кремнеземистого материала и асбеста, их формуют, подвергают автоклавной обработке, сушке и механической обработке. Известково-кремнеземистые изделия (ИКИ) получили широкое распространение для изоляции котлов и трубопроводов. Изготавливаются они в виде плит, полуцилиндров и сегментов. Для изоляции котлов применяют плиты с размерами $1000 \times 500 \text{ мм}$, толщиной 75 и 100 мм. Предельная температура применения изделий 600°C ; объемная масса (в сухом состоянии) не более 225 кг/м^3 , теплопроводность при 100°C примерно $0,062 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C)}$. Предел прочности на изгиб у изделий не менее 3 кгс/см^2 ; изделия хорошо режутся и обрабатываются. Светловодским заводом для ограждений мощных котлов изготавливаются плиты ИКИ с дополнительно нанесенным на них износостойчивым слоем шамотобетона в 40 мм. В плиты заложена стальная арматура, служащая для крепления плит к несущему каркасу. Общая толщина плиты с слоем шамотобетона составляет около 200 мм. ИКИ с дополнительным слоем шамотобетона и арматурой для крепления очень удобны и экономичны для выполнения ограждений стен экранированных котлов и являются перспективным материалом (см. гл. 5).

Вулканитовые изделия

Вулканит (ГОСТ 10179-74) получают из смеси извести и асбеста путем формования, автоклавной обработки и сушки. Изоляционные плиты и полуцилиндры изго-

тавливают двух марок 350 и 400 с объемной массой 350 и 400 кг/м³; плиты изготавливаются размером 500×170 мм, толщиной 30, 40, 50 и 70 мм. Предельная температура их применения не более 600°C; коэффициент теплопроводности при 125°C лежит в пределах от 0,076 до 0,085 ккал/(м·ч·°C), а предел прочности при изгибе не менее 3,0—3,5 кгс/см².

Совелитовые изделия

Совелит (ГОСТ 6788-74) — смесь солей углекислого магния и углекислого кальция с асбестом. Асбестовые изделия получают путем прессования и сушки смеси. Совелитовые плиты изготавливаются размером 500×170 мм, толщиной от 30 до 60 мм с интервалом через 10 мм. Предельная температура применения совелитовых изделий 500°C. Однако практика показывает, что при длительной работе с температурой более 450°C совелитовые изделия меняют свою структуру, рассыпаются и не допускают повторного использования при ремонтах. Совелитовые изделия изготавливаются двух марок 350 и 400 с теплопроводностью от 0,078 до 0,082 ккал/(м·ч·°C) при 100°C и пределом прочности при изгибе от 2,0 до 2,2 кгс/см². Недостатком изделий из совелита являются малая механическая прочность и хрупкость.

Совелитовый порошок (ТУ 36-131-69 ММС СССР) получается размолом разрушенных совелитовых изделий. Раствор совелитового порошка применяется в виде мастики для кладки плит и других изделий, заполнения небольших трещин и пустот в совелитовой изоляции. Предельная температура применения порошка 500°C, объемная масса в сухом состоянии около 250 кг/м³ и коэффициент теплопроводности при 25°C около 0,08 ккал/(м·ч·°C).

Перлит и изделия на его основе

Перлит (ГОСТ 10832-74) — пористый вспученный материал в виде песка или щебня, получается при термической обработке дробленых вулканических стекол. В зависимости от размера зерен перлит делится на следующие фракции: мелкий песок до 1,2 мм, крупный 1,2—5 мм. Щебень мелкий 5—10 мм, щебень крупный 10—20 мм. Перлитовый песок различных фракций применя-

ется в качестве заполнителя теплоизоляционных изделий, растворов и засыпной изоляции. Перлитовый щебень и крупный песок применяются для изготовления перлитобетонов. Температура применения вспученного перлита не более 800°C. Коэффициент теплопроводности перлитного песка колеблется от 0,045 до 0,06 ккал/(м·ч·°C) в зависимости от его объемной массы, составляющей от 100 до 250 кг/м³.

Вспученный перлитовый порошок (МРТУ 6-ЕУ-231-62) применяют в качестве засыпной изоляции, объемная масса порошка равна около 80 кг/м³, коэффициент теплопроводности при средней температуре 85°C не более 0,027 ккал/(м·ч·°C).

Перлитовые изделия на керамической связке (ГОСТ 21521-76) получают путем формовки перлитовой и глинистой смеси, сушки и обжига. Предельная температура применения 900°C. Изделия изготавливаются четырех марок: 250, 300, 350 и 400. Коэффициент теплопроводности при 25°C в зависимости от объемной массы лежит в пределах от 0,065 до 0,09 ккал/(м·ч·°C); предел прочности на сжатие от 3,0 до 12,0 кгс/см². Изделия изготавливаются в виде плит, скорлуп и сегментов. В ограждениях котлов применяются плиты размером 500×500 мм при толщине в 40 и 50 мм.

Перлитовые изделия на цементной связке (ГОСТ 18109-72) изготавливаются путем формовки смеси перлитового песка, асбеста и цемента с последующей сушкой и твердением. Предельная температура применения перлитцементных изделий 600°C. В ограждениях котлов применяют только плиты с размером 500×500 мм при толщине 50 и 75 мм. Плиты имеют марки 250, 300, 350. Коэффициент теплопроводности при 25°C лежит в пределах от 0,06 до 0,07 ккал/(м·ч·°C), а предел прочности в зависимости от марки изделия составляет от 2 до 3 кгс/см².

Перлитогелиевые изделия (ТУ-2-67 МЭ и Э) получают промышленное распространение благодаря меньшей объемной массе и меньшему коэффициенту теплопроводности. Перлитогелиевые изделия изготавливают формовкой из перлитового песка, асбеста, обработанного серной кислотой, и тонкомолотой силикатной глыбы с добавлением кремнефтористого натрия. Изделия выпускаются двух марок 200 и 250. Предельная рабочая температура их применения 650°C. Коэффициент теплопроводности при

25°C составляет около 0,056 ккал/(м·ч·°C). Для ограждений котлов применяются плиты с длиной 490, 500 мм, шириной 360, 500 мм и толщиной 50—75 мм. Из-за дефицитности изделий применение их ограничено.

Вермикулит и изделия из него

Вспученный вермикулит (ГОСТ 12865-67) представляет собой сыпучий зернистый материал, полученный обжигом природной гидратированной слюды. В зависимости от размера зерен вермикулит делится на фракции: крупный 5—10 мм, средний 0,6—5 мм и мелкий до 0,6 мм; по значению объемной массы — на марки «100», «150» и «200». Коэффициент теплопроводности при 25°C колеблется в пределах от 0,055 до 0,065 ккал/(м·ч·°C). Вермикулит применяется в качестве сыпучей изоляции для неподвижных поверхностей с температурой до 1100°C и вибрирующих поверхностей — до 900°C и служит сырьем для изготовления изделий, бетонов и растворов.

Асбестовермикулитовые изделия (ГОСТ 13450-68) изготавливаются путем формовки из смеси вспученного вермикулита с добавкой связующих веществ. В зависимости от объемной массы изделия выпускаются трех марок: 250, 300 и 350, коэффициент теплопроводности асбестовермикулитовых изделий находится в пределах от 0,075 до 0,085 ккал/(м·ч·°C), предел прочности от 1,8 до 2,5 кгс/см², температура применения 600°C. Для охлаждений котлов асбестовермикулит применяется в виде плит длиной 1000 и 500 мм, шириной 500 мм и толщиной в 40, 50, 80 и 100 мм.

При выборе изоляционных материалов необходимо учитывать все факторы. Длительный опыт эксплуатации котлов показывает, что из теплоизоляционных материалов, приведенных выше, могут быть рекомендованы следующие: для изоляции в области высоких температур частей ограждений, выполняемых в виде кладки, — диатомовый кирпич; для частей, выполняемых в виде монолитного массива или сложной формы, — асбестодиатомовый бетон, который может применяться в качестве промежуточного изоляционного слоя между жаростойким бетоном и изоляцией в тех местах, где по условиям рабочей температуры нельзя поместить более эффективную изоляцию. В качестве высокоэффективной теплоизоляции рекомендуются совелитовые, минераловатные и

высокотемпературной связке и вулканитовые плиты. Минераловатные плиты удобнее в монтаже, так как их размеры больше, обладают большей податливостью, менее хрупки и хорошо режутся. Совелитовые близки по своим показателям к вулканитовым плитам; те и другие дефицитны. Асбестовермикулитовые плиты дорогие, очень хрупки, а промышленное производство их ограничено; поэтому следует избегать их применения.

Для изоляции криволинейных поверхностей с нестандартными радиусами кривизны и некоторых испытывающих деформации узлов (углы топок с натрубной обмуровкой) приходится применять минераловатные матрацы, несмотря на их недостатки. В этих случаях матрацы должны быть очень тщательно изготовлены, плотно и равномерно набиты и хорошо прошиты. Толщина отдельных слоев матрацев не должна превышать 50 мм. Изоляцию матрацами следует производить в 2—3 слоя.

Помимо этих рекомендуемых материалов, выше были приведены показатели новых изоляционных материалов, которые получают распространение в связи с увеличением их производства. К ним относятся перлитогелевые, известково-кремнеземистые плиты и асбоперлитовая изоляция, выполняемая методом напыления. Эти материалы имеют хорошие показатели, и стоимость их ниже. Однако известково-кремнеземистые плиты пока выпускаются в небольших количествах, перлитогелевые еще в меньших. Известково-кремнеземистые плиты и асбоперлитовая изоляция получили наибольшее распространение при выполнении ограждений мощных котлов.

3-6. ПОКРОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Покровные материалы имеют несколько назначений: отделка поверхности изоляции, защита от внешних механических воздействий, обеспечение воздушной и газовой плотности. В тех случаях, когда покровный слой служит для отделки и защиты от атмосферных осадков, применяют асбоцементную штукатурку, которая наносится по изоляционному материалу с твердой поверхностью или по специально натянутой и закрепленной металлической сетке. Когда к покровному слою предъявляются требования газонепроницаемости, рекомендуется применять магнезиальную обмазку института Оргэнергострой, проверенную в длительной эксплуатации. Магнезиальная

обмазка наносится по натянутой и закрепленной плетеной сетке, образуя плотный и очень прочный защитный слой толщиной 15—20 мм. Магнезиальная обмазка не размывается горячей водой и обладает несколько большей пластичностью по сравнению с другими. Кроме обмазки, предложены иные способы и рецепты специальных масс для уплотнения и покрытия ограждений по изоляционному слою. Так, например, в качестве уплотнителя покрытия предложена оклейка наружных поверхностей различными тканями (мешковиной, миткалем и стеклотканью) на специальных составах. В ЦКТИ разработаны (РТМ 24.009.047) покрытия обмуровки котлов синтетическими материалами. Уральское отделение ВТИ рекомендует оклейку поверхностей стеклотканью марки Т на растворе поливинилацетатной эмульсии. Имеются и другие рекомендации по оклейке поверхностей ограждений в целях их уплотнения. Однако следует отметить, что все эти рекомендации применялись в опытным порядке и не всегда давали положительные результаты. Объясняется это тем, что синтетические материалы стареют, становятся хрупкими, утрачивают эластичность, разрываются при перемещениях ограждений и отстают от поверхности, на которую наклеены. Поэтому применять такого рода уплотнения необходимо с большой осторожностью. Комбинат Центроэнерготеплоизоляция разработал способ уплотнения наружных поверхностей ограждений котлов волокнистым асбестом на жидком стекле. Уплотнительная масса наносится методом напыления с добавлением нефелинового антипирена. Покрытие наносится в два слоя, один из которых служит изоляцией, с объемной массой около 220 кг/м³, другой, более плотный, играет роль защитного и уплотняющего слоя. Опыт применения этого уплотнения показывает его достаточную прочность при отсутствии трещин на поверхности ограждения. Составы рекомендуемых масс для покрытия и уплотнения ограждений котлов помещены в приложении 5.

3.7. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ОБМУРОВКИ И ИЗОЛЯЦИИ

В современных облегченных конструкциях ограждений применение металла для всевозможных опор и креплений получило большое распространение. Для разгруз-

ки обмуровки и передачи ее массы на каркас котла в зависимости от рабочей температуры слоя, в котором размещаются опоры, применяют различные чугуны и стали. Сложность выбора и применения изделий из этих материалов заключается в том, что для неэкранированных стен обмуровки они работают в условиях высоких температур и с окислительнообразованьем. Поэтому для несущих деталей и арматуры должны выбираться пониженные напряжения, обеспечивающие надежность и долговечность их работы. В практике известны случаи, когда разрушение жаростойкого бетона внутри газоходов происходило из-за нарушения прочности его креплений и арматуры, изготовленных из материалов, имеющих недостаточную жаропрочность и окислительность. Поскольку каких-либо утвержденных нормативов по применению чугуна и сталей в ограждениях котлов нет, каждый котлостроительный завод и конструкторское бюро применяют их по собственному опыту. Некоторые рекомендации по применению чугунов и сталей, проверенных в длительной эксплуатации новых и реконструированных ограждений котлов, приведены ниже.

Углеродистая сталь

Предельная температура применения углеродистой стали в неагрессивной среде не более 450—500°C. Для прочностных расчетов несущих конструкций наименьшие значения пределов текучести σ_t^t применительно к наиболее распространенной стали марки Ст3 (ГОСТ 380-71) и допускаемые напряжения на растяжение (сжатие) с коэффициентом запаса по пределу текучести $\eta_t=1,5$ приведены ниже:

Рабочая температура, °C	20	200	250	300	350	400	450
Условный предел текучести σ_t^t , кгс/мм ²	21	18	17	15,5	13	10,5	8,0
Допускаемое напряжение на растяжение $\sigma_{доп}$, кгс/мм ²	14	12	11,3	10,3	8,6	7,5	5,3

Для металлоконструкций, входящих в обмуровку и ограждения котлов, преднамеренно взяты наименьшие значения пределов текучести и длительной прочности, учитывая возможность воздействия на них усилии и ус-

ловий, которые невозможно определить с достаточной точностью.

Для касательных напряжений допускаемое напряжение принимается $\sigma_{доп} \approx 0,65 \sigma_{доп}$.

Легированная сталь

Для несущих элементов при рабочих температурах более 450°C применяется листовая жаропрочная сталь марок 1Х13; 12ХМ; 15ХМ и Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72). Можно применять и другие марки стали; здесь указаны лишь наиболее распространенные. Допустимые пределы длительной прочности приведены в табл. 3-9.

Таблица 3-9

Пределы длительной прочности легированных сталей

Температура, °С	Предел длительной прочности $\sigma_{дл}$, кгс/мм ²			
	1Х13	12ХМ	15ХМ	Х18Н10Т
500	12	9,6	10,3	10,4
550	—	3,4	5,0	10,1
600	—	—	—	7,4
650	—	—	—	4,8

Рекомендуемая температура применения различных марок сталей составляет:

Марка стали	1Х13	12ХМ	15ХМ	Х18Н10Т
Температура, °С	500	540	570	700

При расчетах в качестве допускаемого напряжения рекомендуется принимать предел длительной прочности $\sigma_{дл}$ с коэффициентом запаса не менее $\eta_{дл} \geq 1,5$ для обеспечения работы в течение 100 000 ч. Применение легированных сталей для креплений обмуровки следует ограничивать, так как эти стали являются фондируемыми материалами. Для опорных деталей и креплений легированные стали во многих случаях могут заменяться специальными марками чугуна.

Чугун

В табл. 3-10 приведены данные для серого и специального чугуна с указанием предельной рабочей температуры и прочностных характеристик по ГОСТ 7769-75.

Для расчета несущих элементов обмуровки, находящихся в зоне высоких температур, следует определять допускаемые напряжения, исходя из предела длительной прочности чугуна при рабочей температуре. В связи с отсутствием данных по пределам длительной прочности для всех чугунов в качестве допускаемого напряжения рекомендуется принимать: для элементов, работающих при температурах до 600°C, — предел прочности на растяжение при рабочей температуре с коэффициентом запаса $\eta \geq 10$; для элементов, работающих при температурах 800—1000°C, — допускаемое напряжение $\sigma_{доп} \leq 0,3 \div 0,5$ кгс/мм².

При расчете элементов из серых чугунов следует принимать допускаемые напряжения по табл. 3-11.

Из указанных в табл. 3-10 наиболее жаростойкими являются хромистые чугуны. По данным испытаний жаропрочных чугунов [3-4] можно считать, что у чугунов марок ЖЧХ-1,5 и ЖЧС-5,5 при температурах 550—650°C предел прочности снижается у ЖЧХ-1,5 до 20% и ЖЧС-5,5 до 60% уровня начальных свойств. Обе марки чугуна коррозионно-устойчивы в среде продуктов горения. Силаловые чугуны практически невозможно обрабатывать, и по прочности они хуже хромистых.

Номера стандартов и технических условий, наиболее распространенных в ограждениях изделий из низкоуглеродистой и легированной стали, приведены в табл. 3-12. В табл. 3-13 приведены данные о ГОСТ и технических условиях на проволоку из разных марок сталей, областях и допустимых температурах ее применения.

В табл. 3-14 приведены характеристики стальных сеток рекомендуемых размеров для армирования и изготовления оболочек набивных изоляционных изделий из приведенных ранее материалов.

Тканую сетку (ГОСТ 3826-66) с квадратными ячейками общего назначения не рекомендуется применять, так как при раскрое и резке ее края осыпаются. Плетеная сетка, обладая некоторым объемом, более прочно армирует тонкие слои бетонов и наружных покрытий. Такая сетка с № 12-1,2 и 15-1,2 применяется для армиро-

Характеристики серого и специального чугунов

Таблица 3-10

Марка чугуна	ГОСТ	Предел прочности при растяжении при температуре, °C	Предел прочности при изгибе при 20°C, кгс/мм²	Предел прочности при растяжении при 20°C, кгс/мм²	Предел прочности при растяжении при высоких температурах, кгс/мм² (при кратковременных испытаниях)		
					600°C	700°C	800°C
Серые чугуны:							
СЧ 12-28	1412-70	500	28	12	—	—	—
СЧ 15-32	1412-70	500	32	15	—	—	—
Хромистые чугуны:							
ЖЧХ-08	7769-75	550	36	18	15	7	3
ЖЧХ-1,5	7769-75	600	32	15	15	8	3
ЖЧХ-2,5	7769-75	650	32	—	15	9	3
ЖЧХ-3,0	7769-75	1000	50	30	30	23	15
Кремнистые чугуны с пластинчатым графитом (силаовые) ЖЧС-5,5	7769-75	800	24	10	10	5	2
Кремнистые чугуны с шаровидным графитом ЖЧСШ-5,5	7769-75	900	—	22	—	12	4

Допустимые напряжения для серых чугунов

Таблица 3-11

Допускаемое напряжение $\sigma_{\text{доп}}$, кгс/мм², для чугунов марок СЧ 12-28 и СЧ 15-32	Температура, °C		
	20	300	500
На сжатие центральное и сжатие при изгибе	10	7	5
На растяжение при изгибе	3,2	2,5	1,6
На срез	2,5	1,8	1,25

Стандарты и технические условия для сталей, применяемых в ограждениях

Таблица 3-12

Наименование стали	ГОСТ на сортмент	ГОСТ на технические условия и требования	Характеристика выпускаемых изделий
Углеродистые стали			
Тонколистовая	19904-74	16513-70	—
Толстолистовая	19903-74	14637-69	—
Полосовая	103-76	535-58	Ширина 12—200 мм, толщина 4—60 мм
Лента стальная упаковочная	3560-73	Из мягкой углеродистой стали	Ширина 15—20 мм, толщина 0,3—0,9 мм
Лента стальная горячекатаная	6009-74	То же	Ширина 20—200 мм, толщина 1,2—3,8 мм
Квадратная сталь	2591-71	535-58	—
Круглая сталь	2590-71	535-58	—
Уголок равнобокий	8809-72	535-58	—
Уголок неравнобокий	8810-72	535-58	—
Сталь высоколегированная			
Сталь тонколистовая	7350-77, группа Б	19903-74	Листы толщиной 4—50 мм
Сталь коррозионно-жаростойкая	4405-75	5949-75	Ширина 10—250 мм, толщина 3—75 мм
Сортовая полосовая	19904-74	5582-75	Листы толщиной 0,8—4 мм
Тонколистовая	103-76	—	Ширина 12—200 мм, толщина 4—60 мм (из стали X18Ni10T)
Теплоустойчивая и жаропрочная сталь			
Полосовая			

Стандарты и технические условия для проволоки из разных сталей

Наименование проволоки	ГОСТ на сортament и технические условия	Марки сталей	Предельная рабочая температура, °C	Примечания
Проволока низкоуглеродистая	3282-74	Ст.2 Ст.3	<500	Для армирования шамотобетонного и теплоизоляционного слоев при экранировании стен обмуровки ($s/d \leq 1,10$). Выпускается диаметром до 10 мм; при $t > 450^\circ\text{C}$ — интенсивное окисление
Проволока из легированной стали	18907-73	1X13 2X13	<800	Для армирования шамотобетонного слоя обмуровки при экранировании стен $s/d \leq 1,20$. Выпускается диаметром до 6 мм
То же	18907-73	X18H10T	<800	Стабильность структуры при $t > 550^\circ\text{C}$
То же	18907-73	X17	900—1000	Для армирования слоев шамотобетона и теплоизоляционного бетона в области газоповоротной камеры и конвективных газопроводов. Выпускается диаметром до 6 мм. При $t > 550^\circ\text{C}$ падает прочность
Проволока из углеродистой стали	6727-53	MCr3 MCr3кп MCr2кп	<500	Для изготовления арматурной сетки

Характеристики стальных сеток

Таблица 3-14

Название и номер сеток	Размер ячейки, мм	Диаметр проволоки, мм	Ширина полотна, мм	Масса, кг/м²
Сетка стальная плетеная одинарная с квадратными ячейками (ГОСТ 5336-67): 12-1,2 15-1,2 20-1,6	12 15 20	1,2 1,2 1,6	1000 и 1600	1,7 1,51 1,96
Сетка стальная крученая с шестигранными ячейками (ЧМТУ 3609-53): 20-0,5	20	0,5		0,38
Сетка сварная для армирования железобетонных конструкций (ГОСТ 8478-66): 150×150×3/3 100×100×3/3 100×100×5/5	150 100 100	3 3 5	1100, 1300, 1400, 1500, 1700, 2300, 2500, 2700, 2900, 3500	0,8 1,20 3,2

вания покровного слоя изоляции, для изготовления матов и матрацев и для набивки изоляции под сетку. Плетеная сетка № 20-1,6 применяется для армирования тонкого шамотобетонного слоя при натрубной обмуровке и для изготовления минераловатных матов и матрацев. Сварные сетки применяются для армирования шамотобетона и теплоизоляционного бетона. Для изготовления сварных сеток применяется низкоуглеродистая холоднокатаная проволока (ГОСТ 6727-53). Предельная рабочая температура для сварной сетки 500°C.

Глава четвертая

ТИПОВЫЕ УЗЛЫ ОБМУРОВОК КОТЛОВ

4-1. ОБМУРОВКА ИЗ ШТУЧНЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Наиболее распространенными типами обмуровок котлов являются кирпичная накаркасная и свободно стоящая обмуровки. Они применялись практически на всех котлах старой конструкции. В настоящее время такие обмуровки применяются только на котлах малой и средней производительности. В отдельных случаях на котлах для энергоблоков 200 и 300 МВт применяется накаркасная обмуровка. Основные правила и приемы выполнения обмуровочных работ с применением кирпичной кладки приводятся в инструкции [4-1]. В котлах малой производительности кирпичную кладку иногда выполняют свободно стоящей с опорой на фундамент с отдельным обвязочным каркасом. Крепление невысоких (до 3 м) стен с применением огнеупорных кирпичей производится путем выпуска сплошного ряда шамотных кирпичей через каждые 5—8 рядов по высоте (рис. 4-1, а) или в шахматном порядке парными шамотными кирпичами, заделываемыми в наружную кладку (рис. 4-1, б). Сплошная перевязка и заполнение раствором зазора между огнеупорной кладкой и облицовкой из строительного или изоляционного кирпича не допускаются. Кирпичную кладку выполняют с обязательной перевязкой швов; совпадение швов соседних по вертикали рядов не допускается. Способы перевязки швов кладки показаны на рис. 4-2, а—в. Для обеспечения газоплотности ограждения швы кладки на всю глубину заполняют раствором.

В том случае, когда нагрузка от кладки стены передается на каркас котла, перевязку выполняют фасонными шамотными кирпичами с креплением их к каркасу чугунными клеммерами с установкой разгрузочных крон-

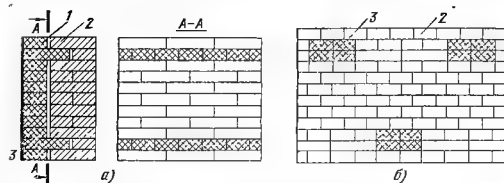


Рис. 4-1. Перевязка огнеупорного кирпича с изоляционным.

а — выпуск сплошного ряда; б — парными кирпичами в шахматном порядке; 1 — огнеупорный кирпич; 2 — изоляционный кирпич; 3 — перевязка.

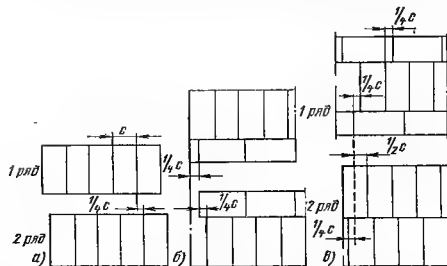


Рис. 4-2. Перевязка швов кладки стен.

а — стена в один кирпич; б — стена в полтора кирпича; в — стена в два кирпича.

штейнов через 2—2,5 м по высоте (рис. 4-3). Клеммеры должны захватывать не менее $\frac{1}{2}$ кирпича шамотной кладки; в кладке недопустимы перекосы и защемления, препятствующие тепловым расширениям обмуровки; фасонные кирпичи должны быть уложены горизонтально и крепиться к клеммерам с соблюдением всех размеров и зазоров. Кладка обмуровки производится с обязательным

устройством горизонтальных и вертикальных температурных швов. Последние выполняют только в огнеупорной кладке, как правило, в углах топок; устройство температурных швов против колонн и балок каркаса недопустимо во избежание их нагрева. Все температурные швы

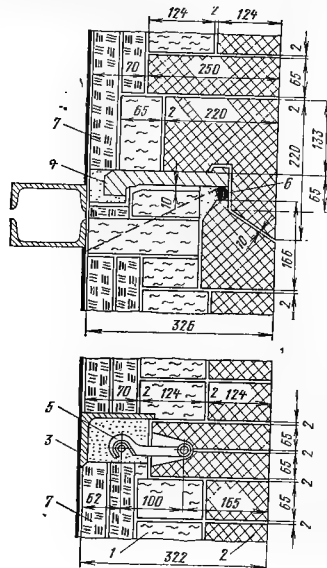


Рис. 4-3. Крепление кирпичной кладки при помощи чугунных кламмеров и разгрузочных кронштейнов.

- 1 — диатомовый кирпич;
- 2 — шамотный кирпич;
- 3 — обшивка;
- 4 — разгрузочный кронштейн;
- 5 — чугунный кламмер;
- 6 — асбестовый шнур;
- 7 — теплоизоляция.

должны быть тщательно очищены от раствора и уплотнены асбестовым шнуром диаметром, на 5 мм большим ширины шва. Металлические детали, закладываемые в обмуровку, должны быть обернуты листовым асбестом толщиной 5 мм и покрыты цементной обмазкой. Кладка обмуровки стен должна соответствовать размерам, указанным в чертежах. Отклонение плоских стен от верти-

кали не должно превышать 5 мм на каждый метр высоты и 20 мм на всю высоту топки. Отклонение верхней поверхности кладки от горизонтали не должно превышать ± 5 мм.

Для кирпичной кладки используют прямые, клиновые и фасонные кирпичи. Основные характеристики и геометрические размеры прямых и клиновых кирпичей даны в ГОСТ 8691-73. Фасонные огнеупорные кирпичи применяются в следующих основных узлах обмуровки котлов: крепления кладки стен, разгрузочные пояса, проход труб через обмуровку, подвесные перекрытия, холодные, шлаковые воронки и амбразуры горелок. Широкое распространение фасонные кирпичи получили в кирпичных обмуровках котлов малой и средней мощности, при капитальных ремонтах и реконструкции газоходов котлов старых конструкций. При ремонтных работах с особой тщательностью должны выполняться узлы сопряжения новой кладки со старой. Перевязка новой кладки с существующей зашлакованной кладкой не допускается: все неровности старой кирпичной кладки должны быть хорошо зачищены и зашлакованные кирпичи удалены. При ремонте обмуровки обычно используют существующие в иаилини фасонные кирпичи и их крепления, которые следует заказывать по чертежам завода — поставщика котла. В тех случаях, когда приходится заказывать фасоны новой формы, выполняются специальные чертежи с указанием на них материала и технических условий. При этом следует учитывать стоимость фасонных кирпичей, зависящую от их сложности и размеров заказываемой партии.

В ограждениях современных мощных котлов кирпичная кладка, как правило, отсутствует. Накаркасная обмуровка выполняется из жаростойкого бетона и изоляционных материалов, кладку из фасонного кирпича применяют лишь для обмуровки горелочных аппаратов.

При проектировании обмуровок с фасонным кирпичом необходимо стремиться к уменьшению их типоразмеров, количество которых для отечественных котлов обычно составляет 10—12 на весь котел.

Материалом для фасонных изделий (кирпичей) служит шамот на глиноземистой связке. Технические условия и марки изделий соответствуют ГОСТ 390-69 с некоторыми дополнительными требованиями, которые оговариваются при заказе. Фасонные кирпичи в зависимости

от степени сложности их изготовления делятся на три основные группы: простые, сложные и особо сложные. Для футеровки горелок следует применять фасонные кирпичи из материала марки ША с огнеупорностью не менее 1730°C. Для всех остальных участков экранированной топочной камеры и следующих за ней газоходов приме-

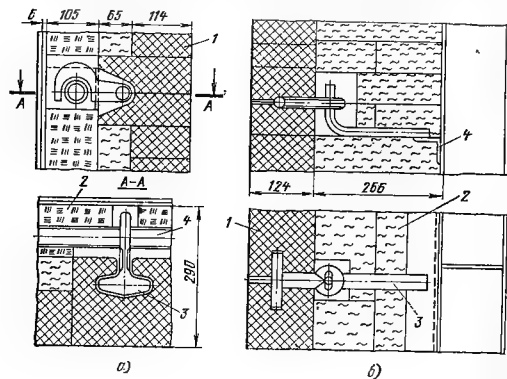


Рис. 4-4. Крепление обмуровки клямерами.

а — чугунный кляммер; б — стальной кляммер; 1 — огнеупорный кирпич; 2 — изоляция; 3 — кляммер; 4 — крепление кляммера к каркасу котла.

няют фасонные кирпичи из материала марки ШБ с огнеупорностью 1670°C.

Типовыми узлами обмуровки можно считать участки вертикальных стен топки и конвективной шахты, показанные на рис 4-3. Однако и здесь, учитывая относительно низкие температуры обмуровки за экранными трубами с тесным шагом вместо чугунных кляммеров (рис. 4-4, а), часто применяют упрощенный вариант крепления с помощью стального клямера — притяжки (рис. 4-4, б) и упрощенные конструкции разгрузочных кроштейнов.

На рис. 4-5 показан вариант узла обмуровки с выходом труб поверхностей нагрева через кирпичную кладку.

В районе выхода труб армированный жаростойкий бетон 1 выполнен с температурным швом; со стороны газов сделан плавный переход от одной толщины кирпичной

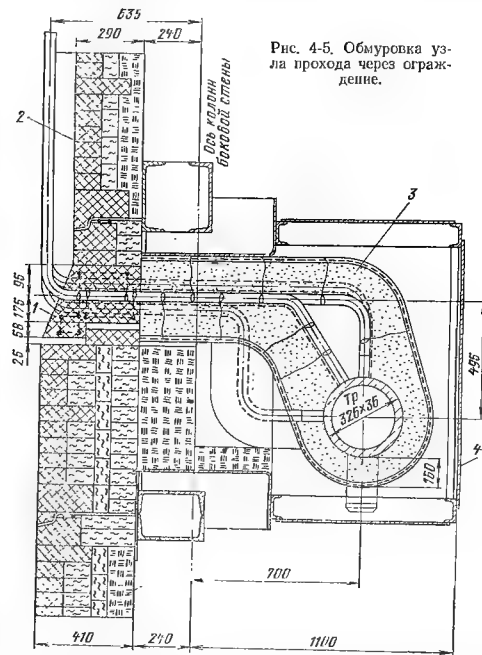


Рис. 4-5. Обмуровка узла прохода через ограждение.

кладки 2 к другой. Трубы 3 после выхода изолированы вместе со сборной камерой; газоплотность достигается за счет обмазки поверх изоляции и металлического цельносварного короба 4. На рис. 4-6 показан вариант обму-

ровки холодной воронки толки. Стыковку плит обмуровки 1 с кирпичной кладкой 2 производят с помощью армированного бетона 3. Шамотная кирпичная обмуровка применяется в современных мощных котлах с накаркасной плитной (щитовой) обмуровкой в местах, где по ус-

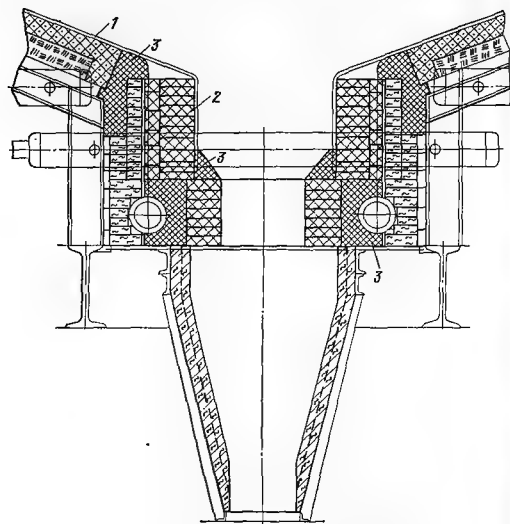


Рис. 4-6. Обмуровка холодной воронки котла.

ловиям работы необходимо применение огнеупорных материалов, — район горелок, поворотная камера и участки конвективной шахты. К достоинствам такой кирпичной обмуровки следует отнести простоту ее ремонта и более длительный срок службы по сравнению с жаростойким бетоном монтажного изготовления.

4-2. ОБМУРОВКА ИЗ ЖАРОСТОЙКИХ БЕТОНОВ

Для сокращения сроков монтажа котла обмуровку приспособляют к условиям блочной сборки. Попытки механизировать процесс укладки кирпичей при обмуровке котлов не дали положительных результатов. Необходимость сокращения сроков обмуровочных работ — одна из основных причин применения жаростойких бетонов. Применение жаростойких бетонов дает возможность изготавливать механизированным способом без обжига крупные блоки любой конфигурации, т.е. заменить трудоемкий процесс ручной кладки из кирпича. По расчету трудоемкость монтажа 1 м^3 конструкции из сборных армированных жаростойких бетонных элементов примерно в 10 раз меньше трудоемкости выполнения кладки закругленных стен и сводов из огнеупорного кирпича. Подсчет эффективности применения жаростойких бетонов вместо штучных огнеупоров показывает, что 1 м^3 бетона в готовой конструкции дешевле примерно на 30% 1 м^3 огнеупорной кладки [4-2]. Кроме того, уменьшение толщины жароупорного защитного слоя позволяет значительно снизить массу обмуровочной конструкции. Это привело к созданию щитовой обмуровки, изготавливаемой из армированного жаростойкого бетона на монтажных площадках электростанций. Такую обмуровку изготавливают в виде плит больших размеров (щитов), которые чаще всего повторяют размеры и конфигурацию блоков из экранных труб. Щиты обмуровки после их изготовления собирают вместе с экранными блоками в единый монтажный узел на сборочной площадке и устанавливают на котле, что значительно увеличивает блочность его монтажа. Наряду с положительными сторонами такая обмуровка имеет и недостатки: качество бетона и его долговечность в эксплуатации зависят от качества исходных материалов, технологии изготовления жаростойкого бетона, режима его первого разогрева и других факторов, которые в монтажных условиях не всегда удается выдержать. Кроме того, такая обмуровка не технологична при ремонтах.

За обмуровкой из жаростойких бетонов, изготавливаемой в виде больших плит или щитов, закрепилось название плитной или щитовой. Название «щитовая обмуровка» относится и к крупногабаритным обмуровочным плитам, изготавливаемым на монтажных площадках.

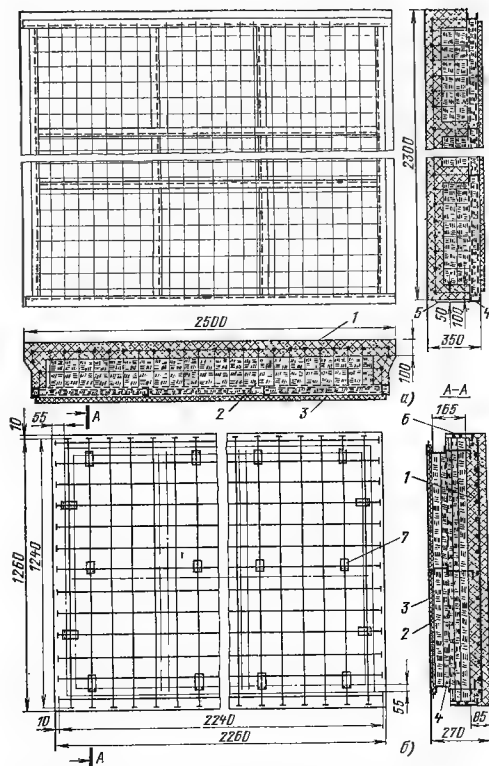


Рис. 4-7. Плитная (щитовая) обмуровка монтажного изготовления.
а — со сложной формой жаростойкого бетона; б — с простой формой жаростойкого бетона.

По форме щитовая обмуровка из жаростойкого бетона изготавливается двух типов: со сложной формой (рис. 4-7, а), когда в плите имеются боковые обрамляющие стенки и промежуточные ребра жесткости из бетона, и с простой формой (рис. 4-7, б), когда жаростойкий слой бетона выполняется в виде плоской плиты. При этом рама обмуровки из швеллеров может быть скрыта в слое изоляции или вынесена за ее пределы. На рис. 4-7, а показана плита обмуровки котла ПК-41 с рамой из швеллеров. Армированный жаропрочный бетон плиты 1 закреплен на раме из швеллеров 4; между бетоном и рамой сделана изоляция 2, по наружной стороне рамы натянута сетка, на которую наносится газоплотная обмазка 3. Жаростойкий бетон при помощи армирующего проволоочного каркаса закрепляется на раме. Кроме того, при вертикальном расположении плит к нижней части швеллерной рамы привариваются пластины 5, которые играют роль разгрузочных кронштейнов. Обмуровочные плиты крепятся к каркасу монтажного блока из труб приваркой к швеллерной раме. Это позволяет производить установку обмуровочных плит на сборочной площадке и на смонтированной стене из каркаса и труб котла. Обмуровочные плиты, имеющие плоский жаростойкий бетон (рис. 4-7, б), также имеют швеллерную раму 4, к которой привариваются гибкие полосы 7, предназначенные для закрепления слоя армированного бетона 1. Между слоем бетона и рамой помещена изоляция 2, а по наружной стороне рамы на сетку 3 наносится газоплотная обмазка. По наружному контуру плиты приварены скобы из проволоки диаметром 6 мм и к ним привязана проволока 6 диаметром 2 мм, удерживающая изоляцию от выпадения. Одновременно проволока армирует обмазку боковой поверхности плит для защиты изоляции от попадания в нее влаги при хранении. Крепление обмуровочной плиты производится приваркой швеллерной рамы к каркасу монтажного блока экранных труб.

На рис. 4-8, а схематически показан общий вид монтажного блока ПРЧ котла П-50, состоящего из трубной части 1, сборной камеры 2 и металлического щита 3 с обшивкой 4. В таком виде блок с завода-изготовителя отправляется на монтажную площадку электростанции. При изготовлении щитовой обмуровки (рис. 4-8, б) необходимо устанавливать армировку жаростойкого бетона 5 и закладные детали для его крепления 6, для чего син-

мают трубную часть блока. После изготовления обмуровки трубную часть блока ставят на место, и блок готов для установки на котел.

На рис. 4-9 показаны варианты выполнения стыков плит: горизонтального *а*, вертикального *б* и углового *в*.

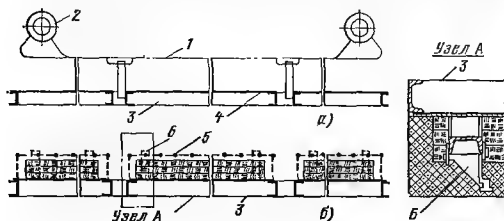


Рис. 4-8. Общий вид монтажного блока НР4 котла П-50.

а — вид на монтажный блок без обмуровки; *б* — вид на штыковую обмуровку без трубной части монтажного блока.

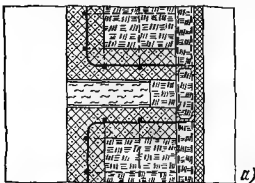
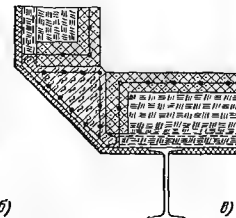
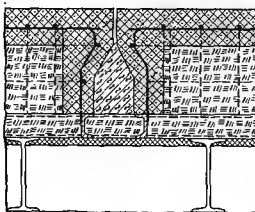


Рис. 4-9. Варианты выполнения стыков штыковой обмуровки.

а — горизонтальный стык; *б* — вертикальный стык; *в* — угловой стык.



Горизонтальный стык призматической формы предусматривает использование диатомового кирпича и изоляции. В местах прохода крепления труб экрана горизонтальные стыки плит имеют увеличенные размеры до 250—300 мм. Вертикальный стык (рис. 4-9, *б*) и угловой (рис. 4-9, *в*) выполняют, используя диатомобетон или напыляемую изоляцию.

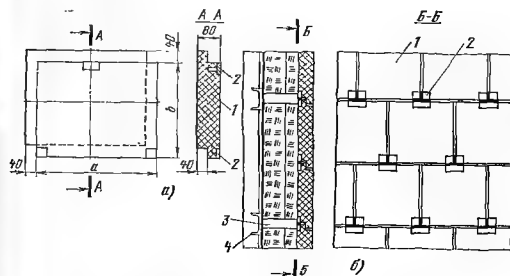


Рис. 4-10. Обмуровка из сборных элементов (плит).

а — бетонная плита; *б* — общий вид обмуровки из сборных бетонных плит.

Обмуровка из сборных элементов, показанная на рис. 4-10, *а*, состоит из монолитных плит *1* толщиной около 80 мм, боковые грани которых имеют стыковочные выступы прямоугольной формы. Выступы образованы условным сдвигом по диагонали двух равных частей плиты в плоскости параллельно граням [4-3]. Такой профиль плит размером 398×398×70 мм был применен ЦКБЭнерго в 1959 г. при реконструкции котла Днепродзержинской ГРЭС. Плиты обеспечивают их стыковку с перекрытием зазоров по всем граням без раствора, защищая следующий за бетоном изоляционный слой от прямого излучения топочной камеры. Составы жаростойкого бетона и технология изготовления из него плит для сборных участков разработаны УралВТИ. Геометрические размеры плит приведены в табл. 4-1.

Масса наиболее тяжелого элемента из бетона с $\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$ не превышает 20 кг, что позволяет осуществлять сборку элементов вручную непосредственно на

Таблица 4.1

Геометрические размеры обмуровочных элементов

Номер элемента	Размеры, мм		
	a	b	δ
1	410	235	80
2	410	325	80
3	410	275	80

котле. Каждый элемент (рис. 4-10,б) имеет закладные металлические детали 2, которые служат для скрепления их между собой и приварки к ним деталей 3, фиксирующих сборные элементы на каркасе котла 4. Элементы соединяются между собой встык при помощи сварки закладных деталей или дополнительными накладками, охватывающими сразу три смежные закладные детали. К каркасу крепится сразу целая группа элементов, предварительно связанных друг с другом, что уменьшает количество тепловых «мостов». После установки обмуровочных элементов производится укладка изоляционных плит: наружная поверхность последних может быть покрыта газоплотной штукатуркой или обшита листовой сталью.

При капитальном ремонте котла ПК-39 Троицкой ГРЭС СКБ ВТИ был разработан проект реконструкции накаркасной обмуровки с использованием обмуровочных элементов. Получены положительные результаты. Обмуровка из сборных элементов может быть рекомендована для замены щитовой обмуровки при ремонтах и для вновь сооружаемых котлов. Для обеспечения высокого качества жаростойкого бетона подобных сборных элементов необходимо строго соблюдать рецептуру бетона, технологию изготовления, режимы сушки и первого разогрева обмуровки.

4-3. НАТРУБНАЯ ОБМУРОВКА

Усовершенствование обмуровок в направлении получения облегченных и легко ремонтируемых ограждений привело к созданию натрубных обмуровок котлов. На основе разработок ЗиО и ОРГРЭС для котла с естественной циркуляцией типа ПК-19 была применена натрубная бетонная обмуровка топки [4-4]. Натрубная

обмуровка требует наличия жесткой связи между трубами. На котле ПК-19 для этого топочная камера по периметру на отметке 17,75 м была разделена на две части (рис. 4-11,а). Верхняя часть топки имеет кирпичную накаркасную обмуровку с обшивкой, нижняя часть представляет собой так называемую «корзину», состоящую из экранных труб диаметром 76×6 мм с $s/d=1,2$ и горизонтальных поясов жесткости с натрубной обмуровкой.

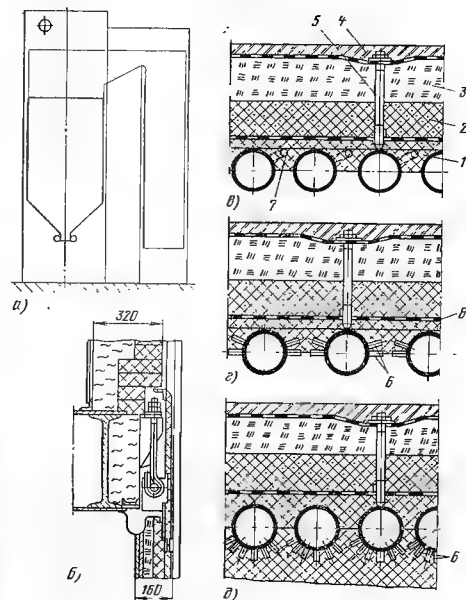


Рис. 4-11. Натрубная обмуровка котла ПК-19.

а — схема котла; б — узел перехода от кирпичной обмуровки к натрубной; в — типовой узел натрубной обмуровки; г — обмуровка в углах топки; д — обмуровка в области зажигательного пояса.

Узел перехода от кирпичной обмуровки к натрубной и конструкция подвески «корзины» показаны на рис. 4-11,б. Типичный узел натрубной обмуровки котла ПК-19 показан на рис. 4-11,в; обмуровка типа показанной на рис. 4-11,г применена только в углах топки на пяти крайних трубах фронтальной и задней стен; в области зажигательного пояса с площадью около 95 м² выполнена по типу рис. 4-11,д. Натрубная обмуровка состоит из четырех слоев различных материалов. Обогреваемый факелом слой обмуровки 1 выполнен из хромитовой массы и закрепляется шпильками 6 или волнообразно изогнутой проволокой 7, приваренной к трубам. Следующий слой 2 выполнен из высокотемпературной изоляционной массы с армированием сеткой 8 с ячейкой 20×20 мм из проволоки диаметром 2,5—3,0 мм. Поверх теплоизоляционных плит 3 натянута сетка с ячейкой 14×14 мм из проволоки с диаметром 1,4 мм, которая служит армировкой для наружной штукатурки 4. Сетка крепится на стержнях 5 диаметром 12 мм с помощью прижимных шайб и гаек. Характерной особенностью данного типа натрубной обмуровки является наличие двух газоплотных слоев: внутреннего, образованного хромитовой массой, и наружного из штукатурки. Высокую газоплотность топки показали испытания после первых лет работы: приток холодного воздуха в топку составил $\Delta a_{\text{т}} = 0,03$ при норме 0,1.

Непосредственная связь обмуровки с трубами экрана значительно снижает температуру внутреннего слоя обмуровки, что, несмотря на малую толщину, обеспечивает температуру наружной поверхности обмуровки около 50°С. Натрубная обмуровка имеет массу около 120 кг/м²; при ремонте обеспечивает легкий доступ к экранной поверхности нагрева. Недостатком натрубных обмуровок является необходимость нанесения жидких слоев обмуровки для выполнения мастичных работ.

На прямоточных котлах натрубная обмуровка была опробована на топке котла ПК-33 [4-5] с горизонтальной навивкой труб. Металлическая часть холодной воронки и обмуровка топки укреплялись на подвесных трубах, расположенных по наружному периметру топочной камеры с шагом 700 мм. Такая обмуровка расширяется вместе с экранами. Обмуровка верхней части конвективной шахты над воздухоподогревателем второй ступени выполнена из кирпичной кладки и опирается на каркас. Воздухоподогреватели и водной экономайзер

имеют металлическую обшивку и покрыты мастичной изоляцией. Типичный узел такой натрубной обмуровки показан на рис. 4-12. На кронштейны, приваренные к подвесным трубам 1, укладываются штампованные полки 2 с отбортованными в разрыве стороны краями, которые удерживают обмуровку от выпадения при появлении избыточного давления в топке. Обмуровка состоит из трех слоев. Первый слой состоит из шамотных плит 3 толщиной 40 мм; второй — из соевитовых плит 4 с общей толщиной 120 мм, которые укладываются с перекрытием и промазкой швов. Третий слой — асбоцементная штукатурка 5 толщиной 15 мм, укладывается на сетку с ячейкой 20×20 мм. Сетка крепится к полкам проволокой. Эксплуатация котла ПК-33 показала, что присосы холодного воздуха в топку котла значительно превышают допустимые нормативные значения. Большие присосы в топочную камеру были вызваны неудовлетворительным состоянием обмуровки холодной воронки и топочной камеры, особенно вокруг горелочных устройств, в местах прохода труб к коллекторам. Кроме того, неплотной оказалась и сама обмуровка из-за недостаточной жесткости экранной системы и отсутствия уплотняющего слоя по трубам, подобного газоплотному в обмуровке котла ПК-19. Попытка увеличить газоплотность ограждения применения только наружного покрытия на основе эпоксидных смол не привела к положительным результатам.

Натрубная обмуровка по гладким трубам для прямоточных котлов дальнейшего распространения не получила.

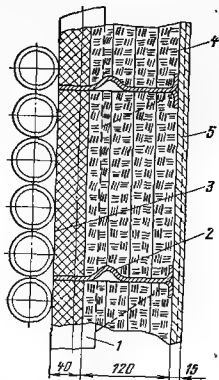


Рис. 4-12. Типичный узел натрубной обмуровки прямоточного котла ПК-33.

1 — подвесные трубы; 2 — полки; 3 — шамотные плиты; 4 — соевитовые плиты; 5 — штукатурка по сетке.

Котлы с металлической обшивкой по трубам выпускаются Барнаульским котельным заводом. Особенности натрубной обмуровки, в которой жаростойкий бетонный слой заменен металлическим листом, примыкающим к экранным трубам, показаны на примере котла БКЗ-420-140-1 [4-6]. Следует отметить, что обмуровка с металлической обшивкой по трубам обеспечивает надежную газоплотность только в котлах с естественной циркуляцией. Газоплотность ограждений котлов кардинально решается в конструкциях с применением цельносварных экранов.

4.4. ОБМУРОВКА ГОРЕЛОК КОТЛОВ

Обмуровка горелок современного котла является особо ответственным узлом, так как с ним связаны длительность межремонтного периода, надежность работы и основное значение присосов воздуха в топку. Надежность и длительность эксплуатации горелки в значительной степени зависят от правильности ее установки и долговечности футеровки. Требования к последней сводятся к следующему:

1. Материал футеровки должен быть достаточно огнеупорным, должен обладать хорошей термической стойкостью, быть шлакоустойчивым и износостойчивым по отношению к механическим воздействиям со стороны частиц топлива, летучей золы и шлаков.

2. Конструкция футеровки в сочетании с конструкцией самой горелки должна обеспечивать возможность качественного монтажа и быть ремонтоспособной. Наиболее изнашиваемые участки должны допускать их беспрепятственную замену.

3. Горелка должна плотно примыкать к стене топки, иметь обмуровку, не допускающую присосов воздуха в топочное пространство. Это требование наиболее полно удовлетворяется при креплении горелки к стене топочной камеры. В том случае, если стена неподвижна, горелка устанавливается неподвижно и опирается на каркас котла. При вертикальном перемещении топочной стены вес горелки передается на стену, к которой она прикреплена. В этом случае ставится специальное разгрузочное устройство, не препятствующее перемещению горелки совместно со стеной.

4. При установке горелок под углом к плоскости топочных стен сложной конфигурации устье футеровки

горелки должно быть защищено экранными трубами. Трубы экрана специально разводят, и их наружную поверхность ошпильовывают для нанесения защитной огнеупорной массы.

В тех случаях, когда футеровка горелки имеет простую цилиндрическую форму или состоит из цилиндрических и конических сопряженных участков, ее проще

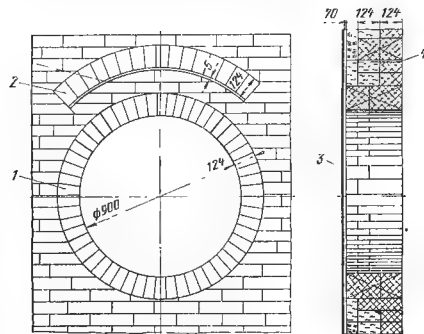


Рис. 4-13. Обмуровка неподвижной горелки цилиндрической формы. 1 — нормальный клиновидный кирпич (сменная футеровка); 2 — разгрузочная арка; 3 — стальной лист; 4 — асбестовый картон.

всего выполнить из шамотных изделий — кирпича нормальных размеров и фасонных камней.

Для ошпильовки экранов в районе горелок применяют шпиль, как правило, из того же материала, что и для стены топочной камеры. Обращенные в топку лобовые шпиль выполняются той же длины (ОСТ 24.410.23-73), что и для обычных плоских экранов, боковые шпиль в плоскости стен и в местах разводки труб с большим шагом могут выполняться более длинными. В местах разводки труб, в верхней и нижней части амбразур, где участки стен имеют вид небольших треугольников, для защиты допускается приварка к трубам плавников толщиной 5—6 мм. Плавники должны иметь глубокие про-

рези через каждые 100 мм для снятия температурных напряжений в местах приварки их к трубам.

Обмуровка простой неподвижной горелки цилиндрической формы показана на рис. 4-13. Футеровка горелки выполняется из нормального шамотного кирпича. Для кольцевой футеровки применяют поперечный клиновидный кирпич. Диаметры колец, которые могут быть выложены из поперечного клина без подтески кирпича, составляют для большого размера 1400 мм, для малого размера 1290 мм. При необходимости выполнения колец меньшего диаметра в него вставляются подтесанные кирпичи. Последние равномерно чередуются с цельными кирпичами по всей окружности, и таким образом подбирается необходимый диаметр амбразуры. В поперечном направлении кирпичи рекомендуется укладывать в перевязку с обращенной внутрь тесаной поверхностью. Футеровочное кольцо должно быть разгружено от массы лежащей выше кладки и допускать замену при ремонтах. С этой целью над кольцом с некоторым зазором (не более 20 мм) выполняют разгрузочную арку. Если металлический корпус горелки входит в амбразуру, то его поверхность на длине входа оклеивают асбестовым картоном толщиной около 5 мм.

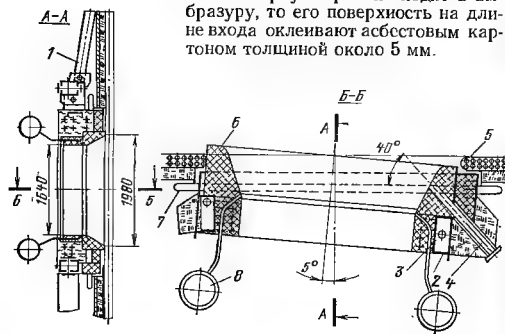


Рис. 4-14. Обмуровка пылегазовой горелки, установленной на экранных трубах.

1 — подвеска рамы; 2 — несущая рама; 3 — обогреваемая труба; 4 — труба для запальника; 5 — разводка огибывающего экрана; 6 — фасонный кирпич; 7 — компенсатор; 8 — подвод газа.

Обмуровка пылегазовой горелки, установленной непосредственно на трубной системе котла, показана на рис. 4-14. При такой установке горелки предусматривается ее вертикальное перемещение вместе с системой экранов. Горелка подвешена к трубам экрана на специальной раме, внутри которой пропущены обогревающие трубы, шунтированные от водопроводящих труб. Обогрев рамы обеспечивает горелке возможность точно следовать за перемещением экрана. Для уплотнения горелки по всему ее периметру установлен стальной компенсатор. Футеровка горелки, обращенная к топочному пространству, выполнена из фасонных шамотных кирпичей. Такой вариант обмуровки горелки был выполнен при реконструкции котла ТП-100 Старобешевской ГРЭС. Его горелки предназначены для сжигания угольной пыли и природного газа с периферийным подводом и футеровкой из жаростойкого бетона. Приведенная схема установки горелки и ее обмуровка обеспечивает сохранность футеровки и газоплотность устройства в целом. Сложность устройства состоит в необходимости обогрева рамы горелки трубами с теплоносителем, имеющим температуру, равную примерно температуре пароводяной смеси в экранных трубах, на которых висит рама горелки.

На рис. 4-15 показан вариант выполнения обмуровки пылеугольной горелки, установленной непосредственно на трубной системе экрана. Перемещение горелки по вертикали происходит вместе с экранной системой. В отличие от предыдущей несущая рама этой горелки утоплена в обмуровку и примыкает непосредственно к экранным трубам, вследствие чего рама имеет практически ту же температуру, что и экранные трубы. Горелка прикреплена к раме на специальных кронштейнах в двух точках, расположенных по поперечной оси. Такая схема установки горелки проще по выполнению и обеспечивает ее газоплотность. Футеровка горелки при реконструкции котла ТПП-100 Старобешевской ГРЭС была выполнена из шамотных кирпичей. Часть футеровки, обращенная в топочное пространство, выкладывается из фасонных кирпичей, следующие кольцо из клиновидного кирпича. Разводка труб охватывает отверстие горелки и защищает кладку от воздействия высоких температур. Трубы, охватывающие отверстие амбразуры, оппосованы, и на них нанесена карборундовая набивная масса.

Обмуровка газомазутной угловой горелки, укрепленной на экранных трубах котла, показана на рис. 4-16. Рама, на которой укреплена горелка, подвешена к экранным трубам и может перемещаться вместе с ними. Так как горелка и рама имеют небольшие размеры, разность

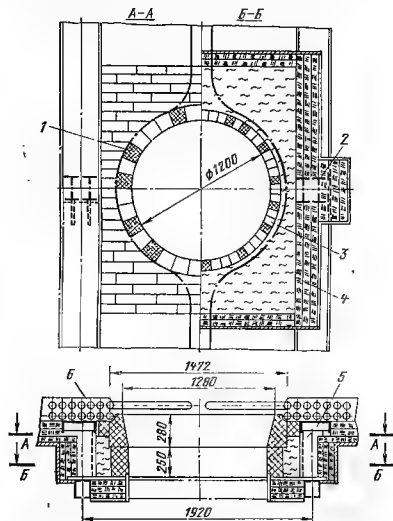


Рис. 4-15. Обмуровка пылеугольной горелки, установленной на экранных трубах.

1 — фасонный кирпич; 2 — опора горелки; 3 — клиновидный кирпич; 4 — корпус горелки; 5 — несущая рама; 6 — набивка массы по шинам.

температур между экранными трубами и необогреваемой рамой приводит к небольшой разности в их взаимных перемещениях. Предполагается, что такая разность перемещений может быть компенсирована податливостью материала футеровки горелки и стены топки. Выходящая в топочную камеру часть горелки футеро-

вана хромомagneзитовой массой, которая охлаждается ошпорованными экранными трубами. Для возможности охлаждения выходной части горелки сделана специальная разводка экранных труб. Применение хромомagneзитовой массы обусловлено ее хорошей устойчивостью при сжигании мазута. Такая обмуровка горелки выпол-

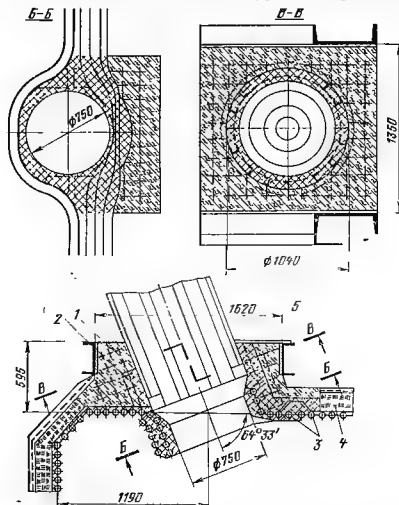


Рис. 4-16. Обмуровка газомазутной угловой горелки.

1 — асбестодиагномный бетон; 2 — шпательбетон; 3 — набивка массы по шинам; 4 — цементные плиты; 5 — асбестовый картон.

нена на котле ТП-15 Невинномысской ГРЭС и работает длительное время.

Обмуровка угловой пылеугольной горелки, установленной на каркасе котла, показана на рис. 4-17. Она закреплена на каркасе котла и сопрягается с щитовой обмуровкой топki, т. е. взаимные перемещения горелки

и стены топки отсутствуют. Выходная часть горелки футерована фасонными кирпичами и защищена особой разводкой труб экрана, которые ошпорованы и покрыты карборундовой или хромитовой массой. Установка и обмуровка горелки выполнены по проекту реконструкции котла ТПП-211А Трипольской ГРЭС.

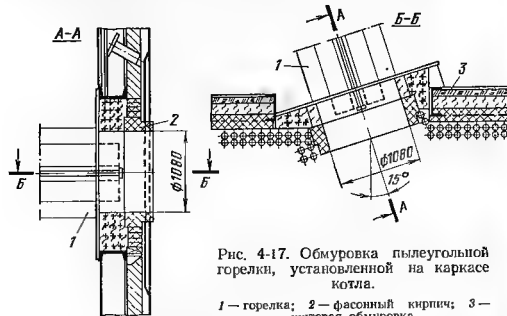


Рис. 4-17. Обмуровка пылеугольной горелки, установленной на каркасе котла.

1 — горелка; 2 — фасонный кирпич; 3 — щитовая обмуровка.

Установка и компоновка горелок ведущими котлостроительными заводами производится по ОСТ 24.30.26-72 и по РТМ 108.30.120-78 «Горелки вихревые пылеугольные пылегазовые, установка, компоновка их с топкой и расчет».

Глава пятая

СБОРНАЯ ОБМУРОВКА ИЗ ПЛИТ АВТОКЛАВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

5-1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБМУРОВОЧНЫХ ПЛИТ АВТОКЛАВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Изготовление и монтаж современных котлов требуют их индустриализации, однако щитовые конструкции обмуровки котлов не позволяют должным образом решить эту задачу. Трудозатраты при выполнении обмуровки велики, и удельный вес их продолжает увеличиваться с ростом единичных мощностей. Проектируемые

мощные котлы с накаркасной обмуровкой базируются на различных ее типах, что не позволяет организовать широкий выпуск элементов обмуровки промышленным способом. При обсуждении вида обмуровок новых котлов указывается на необходимость создания новых конструкций обмуровок, которые дали бы возможность обеспечить унификацию обмуровок, максимальную механизацию обмуровочных работ, ремонтоспособность и централизованную поставку обмуровочных плит. ЦКБ-Энерго разработало конструкцию сборной обмуровки из известково-кремнеземистых плит, офактуренных жаростойким бетоном. Предложенная конструкция сборной обмуровки базировалась на повышении качества материалов, уменьшении объемных и массовых характеристик, простоте сборки и демонтажа обмуровки и организации массового производства элементов обмуровки на специализированных заводах. В качестве материалов были предложены: для защитного слоя — упрочненный днатообетон, для теплоизоляции — известково-кремнеземистый материал. Выбор материалов был основан на сочетании бетона, воспринимающего воздействие топочной среды и обладающего хорошими теплоизоляционными свойствами, с известково-кремнеземистым эффективным теплоизоляционным материалом, что обеспечивает необходимое тепловое сопротивление обмуровки. При этом учитывались возможность совместной технологической обработки материалов и неадекватность сырья. Составы бетона, изоляции и их свойства приведены в табл. 5-1.

Типовым элементом сборной обмуровки является плита (рис. 5-1), состоящая из слоя жаростойкого бетона и известково-кремнеземистой изоляции. Плиты изготавливают автоклавным способом на специализированном заводе, что обусловлено технологией обработки известково-кремнеземистого материала; у жаростойкого бетона автоклавная обработка повышает качество. В процессе автоклавной обработки материалов происходит сращивание бетонного и изоляционного слоев в монолит, которое сохраняется и при тепловой работе плит. Сращивание слоев позволило уменьшить толщину бетонного жаростойкого слоя, который по технологическим соображениям составляет 40 мм. Слой жаростойкого бетона армируют металлической сеткой, изготовляемой из низколегированной проволоки диаметром 4 мм

Таблица 5-1

Свойства бетона и изоляции

Наименование материала	Предельная температура применения, °С	Объемная масса, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, λ (м·с·°С)	Прочность на сжатие, кг/см²	Примерный расход компонентов на 1 м³ материала, кг
Упрочненный диатомобетон	800—900	1100—1200	0,4 при 300°С	30 при 600°С	Портландцемент . . . 370 Диатомит: 1—3 мм . . . 265 3—8 мм . . . 135 Шамот <1 мм . . . 270 Асбест . . . 160
Известково-кремнеземистый материал	600	200—220	0,083 при 300°С	0—8	Известь 72 Асбест, VI сорт . . . 40 Песок молотый или диатомит 8 Гипс полуводный . . . 8

с ячейкой 120×150 мм (ГОСТ 2246-70), обеспечивающей дополнительную прочность плит при перевозках и монтажных операциях. Общая толщина плиты

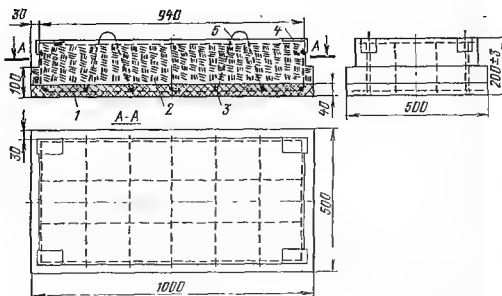


Рис. 5-1. Двухслойная обмуровочная плита автоклавного изготовления (1000×500×200 мм).

1 — шамотобетон; 2 — известково-кремнеземистая изоляция; 3 — каркасная сетка; 4 — уголок для крепления плиты к каркасу; 5 — выступающая арматура (монтажная скоба).

составляет 200 мм. Выбраны два основных типоразмера плит: 1000×1000×200 и 1000×500×200 мм. Кроме того, по согласованию с заводом-изготовителем могут изготавливаться плиты шириной 400, 300 и 250 мм. Из плит собираются обмуровочные блоки нужных размеров, как показано на рис. 5-2.

Первые опытные плиты с применением упрочненного диатомобетона были изготовлены на опытном заводе

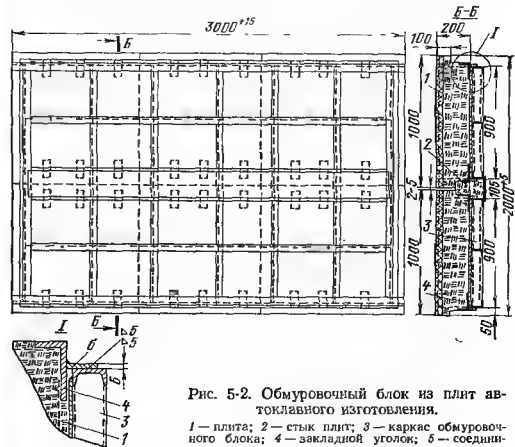


Рис. 5-2. Обмуровочный блок из плит автоклавного изготовления.

1 — плита; 2 — стык плит; 3 — каркас обмуровочного блока; 4 — закладной уголок; 5 — соединительная планка.

ВНИИстром. Тепловые испытания образцов плит, проведенные в ОРГЭС, показали их хорошие теплозащитные свойства, но выявили склонность упрочненного диатомобетона к растрескиванию. В дальнейшем двухслойные плиты неоднократно исследовались на стендах ЗнО, а затем и в промышленных условиях на котле ПК-41. Последующие партии плит для исследований, а затем и промышленные партии плит для обмуровки котлов П-59 и П-57 изготавливались по ТУ 34-48-4616-77 на Светловодском опытном заводе известково-кремнеземистых конструкций.

При изготовлении первой партии плит в качестве жароупорного слоя, кроме упрочненного диатомобетона, был опробован шамотобетон на портландцементе состава по массе, кг/м³: цемента марки 500—300, шамотной крошки — 1250, тонкомолотой добавки из шамота — 250. Шамотный порошок имел следующий фракционный состав: 5—8 мм 750 кг; 0,15—5 мм 500 кг; меньше 0,088 мм 250 кг. Проведенные стендовые и опытно-промышленные испытания этих плит снова выявили склонность упрочненного диатомобетона к растрескиванию. Поэтому дальнейшая обработка конструкции сборной обмуровки из двухслойных плит велась со слоем шамотобетона. Температура применения известково-кремнеземистых двухслойных плит составляет 600—650°C, т. е. практически все экранированные участки могут быть обмурованы такими плитами. При повышенных температурах известково-кремнеземистый материал теряет прочностные свойства не так резко, как соевлит; при $t = 700 \div 750^\circ\text{C}$ прочность изоляции на сжатие составляет $\sigma_{\text{сж}} = 2,5 \div 3,0$ кгс/см².

Применение плит автоклавного изготовления на экранированных участках обмуровки требует изготовления трехслойных плит. Изготовление таких плит из слоев шамотобетона, диатомобетона и известково-кремнеземистой изоляции не представляет трудности.

Сборная обмуровка из плит автоклавного изготовления имеет значительные преимущества по сравнению со щитовой обмуровкой монтажного изготовления: небольшие типоразмеры плит позволяют унифицировать конструкции ограждений котла, а малая толщина слоя жаростойкого бетона и применение известково-кремнеземистой изоляции, превосходящей по своим характеристикам соевлит, позволяет при одинаковом термическом сопротивлении с щитовой обмуровкой значительно уменьшить ее объем (примерно в 1,75 раза) и массу (примерно в 2,0—2,5 раза).

5-2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛИТ АВТОКЛАВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБМУРОВКИ КОТЛОВ

Применение обмуровки из рассмотренных выше плит было заложено в рабочие проекты котлов П-57 для энергоблока 500 МВт и П-59 для энергоблока 300 МВт [5-1]. Оба котла имеют Т-образную компоновку,

однокорпусное исполнение с симметричным размещением поверхностей нагрева в двух конвективных шахтах. Топочная камера, потолок и соединительный газоход экранированы трубами; конвективный газоход не экранирован. Конструктивное отличие котла П-57 от П-59 заключается в применении плавниковых труб в котле П-57. Радиационные панели из плавниковых труб между собой не сварены, в результате чего топочная камера котла П-57 не является газоплотной. Радиационный блок, поставляемый с завода на монтажную площадку, состоит из трубной панели и элементов металлоконструкций. Трубные панели (рис. 5-3) крепятся к элементам металлоконструкций стяжками, расположенными по высоте примерно через 2,5 м. Каркас блока состоит из двух двутавровых стоек, соединенных между собой ригелями и раскосами. В пространство между стойками и трубной системой на монтаже устанавливается сборный обмуровочный блок, который состоит из плит автоклавного изготовления 1, стыков между плит 2, горизонтальных стыков 3, изготавливаемых на монтажной площадке, и вертикальных стыков 4, заполняемых на смонтированном котле. Все стыки покрываются уплотнительным листом 5 по наружной раме из швеллеров обмуровочного блока 9. Горизонтальные стыки выполнены кладкой из шамотного кирпича с последующей изоляцией из известково-кремнеземистых плит. При монтаже кирпичная кладка была заменена набивкой из армированного шамотобетона. Вертикальные стыки по проекту закладывались изоляционными известково-кремнеземистыми плитами, но при монтаже плиты были заменены набивкой из диатомобетона.

Металлическая рама обмуровочного блока выполнена в виде решетки с ячейками 500×500 мм из швеллера № 6,5. С внутренней стороны рамы по контуру приварен металлический лист толщиной 2 мм; к остальным элементам рамы лист крепится электросваркой (точечным соединением металлического листа с рамой за счет его проплавления). В выступающих концах обрамляющей решетки сделаны отверстия, предназначенные для захвата плиты подъемными приспособлениями. Сборку блока (см. рис. 5-2) ведут следующим образом:

1. Согласно спецификации чертежа на плазму с приспособлениями для фиксации положения укладывают

обмуровочные плиты с зазором 3—5 мм. Плиты предварительно проверяют по размерам и качеству.

2. Заполняют стыки между плитами брусками 2 из известково-кремнеземистых плит. При необходимости поверхность плит покрывают слоем выравнивающей штукатурки.

3. На поверхность плит укладывают металлическую раму 3, которую приваривают к закладным уголкам 4 при помощи соединительной планки 5.

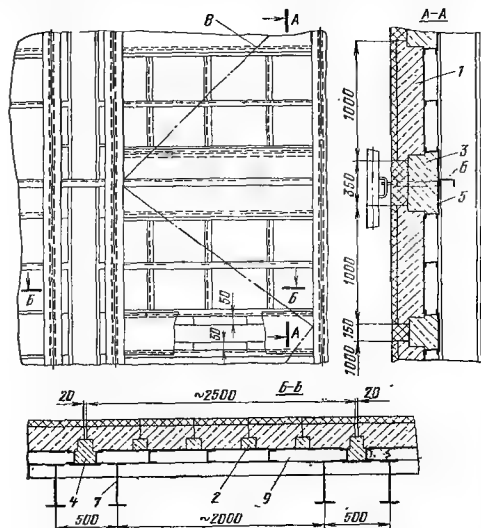


Рис. 5-3. Узел обмуровки стены СРЧ из плит автоклавного изготовления.

1 — обмуровочные плиты; 2 — швы между плитами; 3 — горизонтальный стык между блоками; 4 — вертикальный стык между блоками; 5 — уплотнительный лист; 6 — ригель; 7 — каркас отправочного блока; 8 — раскос каркаса отправочного блока; 9 — рама из швеллеров обмуровочного блока.

Таблица 5-2

Результаты испытаний обмуровки котлов типа П-59

Участок котла	Удельный тепловой поток, ккал/(ч·м²)	Температура поверхности обшивки, °С	Температура окружающего воздуха, °С
Котел № 1			
НРЧ	160	44	30
СРЧ	210	52	38
ВРЧ	245	55	45
Котел № 2			
НРЧ	177	50	36
СРЧ	218	58	39
ВРЧ	220	73	53

После сборки обмуровочные блоки передаются монтажникам для установки. Опыт сборки блоков показал, что имеющие место большие отклонения по толщинам плит от номинального размера (в отдельных плитах до ± 15 мм) требуют снятия слоя изоляции и укладки дополнительно выравнивающего слоя штукатурки по блоку. Если в технологический цикл изготовления двухслойных плит ввести механическую обработку верхнего слоя изоляции плит, изготовленных с плюсовым допуском, то монтаж упростится. В обмуровке котлов необходимо предусматривать отверстия для различного рода гляделок, обдувок и другой гарнитуры. В проекте обмуровки котла П-59 на участках расположения отверстий закладывались обмуровочные плиты монтажного изготовления, хотя проверка показала, что автоклавный бетон с повышенной пористостью относительно легко поддается механической обработке [5-2]. Производительность труда при сборке обмуровки из плит автоклавного изготовления выше, чем при изготовлении щитовой обмуровки, и составляет 0,65—0,7 м³/чел-день против 0,38—0,47 м³/чел-день [5-3].

ЦКБЭнерго и ОРГРЭС провели тепловые испытания такой обмуровки на двух котлах типа П-59. Результаты испытаний приведены в табл. 5-2.

Повышенные значения температуры обшивки котла № 2 объясняются тем, что на нем имелось много неизо-

лированных участков воздухопроводов и трубопроводов. Далее обследования показали, что частичное разрушение жароупорного слоя в плитах, имевшее место из-за неправильной растопки котла, не повлияло на теплоизоляционные свойства обмуровки. Проведенные УралВТИ тепловые испытания обмуровки котла П-57 также подтвердили хорошие защитные свойства плитной обмуровки автоклавного изготовления.

Опыт эксплуатации сборной обмуровки из двухслойных плит автоклавного изготовления показал, что данный тип обмуровки можно считать наиболее эффективным для котлов с накаркасной конструкцией ограждения.

Глава шестая

УПЛОТНЕНИЕ ОГРАЖДЕНИЙ КОТЛОВ

6-1. ВЛИЯНИЕ НЕПЛОТНОСТИ ОГРАЖДЕНИЯ НА РАБОТУ КОТЛА

Присосы воздуха в котлах приводят к снижению их экономичности, увеличению расхода металла, топлива и электроэнергии на собственные нужды. Присос в топку ($\Delta\alpha=0,1\div0,2$) повышает температуру уходящих газов соответственно на 3—8°C, а такой же присос в хвостовой части котла снижает температуру уходящих газов на 8—14°C, увеличивает объем газов и повышает расход электроэнергии на тягу. Чем ближе к топке произошел присос и чем больше его значение, тем выше температура уходящих газов и соответственно ниже к. п. д. котла [6-1]. Например, замеры по котлу ТП-100, проведенные Донецким отделением ОРГРЭС [6-2], показали, что присосы в топочную камеру котла оказались выше допустимых более чем в 2,5 раза и составили $\alpha=0,134$. Из них на долю узла уплотнения горелок приходится 54%; на щелч у балок поясов жесткости 21,5%; на холодную воронку 9% и на трещины в обмуровке 6,5%. В отдельных случаях при нарушении правил изготовления и эксплуатации обмуровок присосы через обмуровку могут составлять существенную долю общих присосов.

Обеспечение газоплотности ограждений является одной из важных задач, стоящих перед проектировщиком.

При этом внимание следует уделять не только плотности самого ограждения, но и конструкции узлов прохода труб через ограждения и их уплотнению. Анализ эксплуатационных данных и обследований работающих котлов показывает, что обмуровки не всегда удовлетворяют требованиям плотности. Это прежде всего относится к работающим и вновь устанавливаемым котлам с гладкотрубными экранами и с накаркасной или натрубной обмуровкой.

Разработке надежных узлов уплотнений для проектируемых и существующих котлов должно уделяться постоянное внимание. Опыт эксплуатации показывает, что затраты на создание надежного уплотнения ограждения быстро окупаются за счет повышения экономичности.

6-2. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ И МАТЕРИАЛАМ УПЛОТНЕНИЙ

Основным назначением наружных защитных покрытий ограждений котлов является создание газоплотности и защиты изоляции котлов от внешних механических повреждений. Наружное защитное покрытие должно обеспечивать удобство очистки ограждений от пыли и отвечать основным требованиям промышленной эстетики.

По характеру работы уплотнения можно разделить на два основных вида: общего и местного назначения. К уплотнениям общего назначения относятся поверхности, которые, обладая определенной газоплотностью, ограждают заданный объем топок и газоходов от контакта с окружающим его воздухом. К уплотнениям местного назначения относятся уплотнения проходов труб, температурных швов, стыков обмуровочных плит, лючков и т. д. Разница в работе вышеуказанных уплотнений состоит в том, что поверхности обмуровки подвергаются незначительным деформациям, которые приводят к небольшим трещинам. Последние приходится уплотнять на всей поверхности в процессе эксплуатации котла. Уплотнения местного назначения воспринимают значительные деформации, обусловленные температурными перемещениями обмуровки, проходящих через нее труб, гарни-туры, горелок и т. д.

Сплошные участки обмуровки, выполненные из жаростойких и теплоизоляционных материалов, имеют доста-

точную плотность, особенно если они многослойны и не имеют сквозных швов. Размеры присосов через поверхность ограждения за счет газопроницаемости материала зависят от разности давлений между окружающей средой и находящимися в объеме газами, толщины ограждения и коэффициента его газопроницаемости. По отношению к допускаемым нормами присосам воздуха в топку котлов присосы через обмуровку за счет газопроницаемости обмуровочных материалов составляют менее 1%, и ими, как правило, можно пренебречь. Опыт эксплуатации показал, что основная доля присосов приходится на уплотнения местного характера, и именно этим узлам следует уделять особое внимание при проектировании ограждений котлов.

Для уплотнений местного назначения лучшими конструкциями являются металлические сварные короба и различного рода компенсаторы. Для местных уплотнений также широко применяются асбестовые волокна и шнур. Однако применение асбестовых изделий следует ограничивать температурой 500°C, выше которой асбест теряет содержащуюся в нем кристаллизационную воду и разрушается. Поэтому применение асбеста ограничивается преимущественно участками обмуровки, расположенными ближе к наружной поверхности. Кроме того, необходимо учитывать, что при значительных деформациях асбестового шнура его упругие свойства не восстанавливаются, что ведет к нарушению уплотнения.

Для местных уплотнений должны применяться конструкции, допускающие необходимые перемещения. К таким конструкциям относятся узлы с компенсаторами скользящего типа или с линзовыми, способными работать на изгиб.

При больших периметрах уплотнения и вертикальных перемещениях применяются гидравлические или песочные затворы. Они должны быть расположены в хорошо доступных местах, позволять очистку и пополнение их водой или песком.

Для наружного уплотнения топочных стен широко распространены уплотнительные обмазки: магнезиальная, асбестошамотная и др. [6-3]. Такие обмазки содержат большое количество асбеста и поэтому обладают определенной эластичностью. Затирка трещин, появляющихся на обмазке после пуска котла, позволяет уплотнить поверхность. Обмазки обычно наносятся по обм-

ной металлической сетке и имеют требуемую прочность. Коэффициент газопроницаемости уплотняющих обмазок составляет 0,3—0,8 л/(м·ч·мм вод. ст.). Часто в наварках обмуровках применяют наружную металлическую обшивку как надежное уплотнение. Расчеты и проведенные испытания тепловой работы обмуровок показывают, что использование наружной обшивки как уплотнения приводит к росту тепловых потерь через ограждение в окружающую среду. Это наблюдается в тех случаях, когда происходит местное повреждение обмуровки, а обшивка не позволяет своевременно его обнаружить. Чаще всего это повреждение устанавливается только при высоком нагреве обшивки. Наружная металлическая обшивка толщиной в 2—3 мм увеличивает расход металла и усложняет ремонт обмуровки.

Хорошим уплотнением топочной камеры, особенно для котлов с естественной циркуляцией, является стальная обшивка по трубам, конструкцией которой удобно сочетать с местными уплотнениями. Однако применение стальной обшивки по трубам возможно только при шаге экранных труб $s/d \leq 1,1$, что обеспечивает защиту обшивки от высокой температуры топочных газов [6-4, 6-5].

В последние годы для наружных газоплотных покрытий начинают использоваться различного рода полимерные материалы на основе полиэфирных, эпоксидных, фенольных и других смол или их комбинаций [6-6, 6-7]. По технологии различают механизированный и ручной способы их нанесения для наружного покрытия. При ручном способе на изоляцию необходимо нанести слой выравнивающей штукатурки, по которой кистью наносится слой покрытия, далее приклеивается стеклоткань, на которую затем кистью наносят слой полимерногo покрытия. Учитывая подготовительные операции по обезжириванию поверхности и стеклоткань, этот способ трудоемок и при нанесении на больших площадях мало эффективен. При механизированном способе нанесения покрытия с помощью пистолета-напылителя в качестве армирующего материала применяется стеклоткань, который измельчают специальным приспособлением. При этом отделка поверхности получается шероховатой «под шубу». Общий вид поверхности с синтетическим покрытием, выполненной ручным (а) и механизированным способами (б), показан на рис. 6-1. Отделка «под шубу» из-за неровной поверхности плохо очищается от пыли,

поэтому разрабатываются приемы по ее выравниванию после нанесения слоя покрытия.

Основным недостатком полимерных покрытий является их сравнительно быстрое старение, ведущее к охруп-

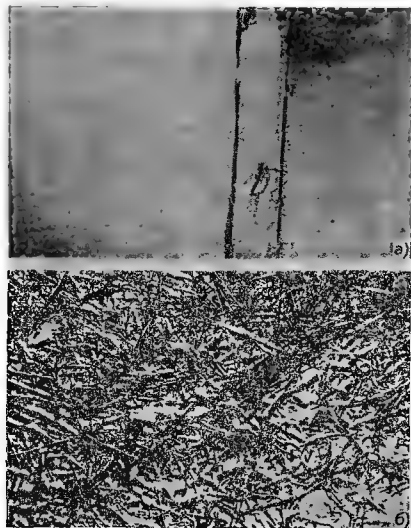


Рис. 6-1. Общий вид поверхности с синтетическим покрытием при ручном нанесении (а) и механизированном (б).

чиванию и растрескиванию слоя под действием теплоты, воды и кислорода воздуха. Работы по защите покрытий от старения заключаются в подборе различных стабилизаторов, которые действуют как замедлители старения.

6-3. УЗЛЫ УПЛОТНЕНИЯ ОГРАЖДЕНИЙ

Ниже приводится описание конструкций наиболее распространенных узлов уплотнения ограждений. На рисунках узлов даны только принципиальные схемы решения различных типов уплотнений. Такие или аналогичные узлы могут быть использованы при конструировании обмуровок новых котлов и реконструкций существующих.

Уплотнение потолочных перекрытий

Потолочные перекрытия требуют уплотнений по периметру в местах сопряжений с боковыми стенами и в местах проходов труб и подвесок.

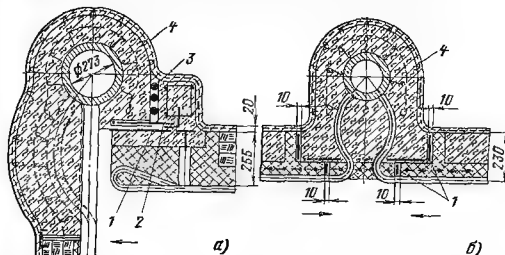


Рис. 6-2. Уплотнение температурных швов в потолочном перекрытии. а — примыкание к фронтальной и боковой стене; б — промежуточный коллектор пароперегревателя; 1 — асбестовый картон; 2 — металлический лист; 3 — асбестовый шнур; 4 — газоплотная обмотка по сетке. Стрелками показано направление перемещения.

На рис. 6-2, а показано уплотнение сопряжения потолка и боковой стены толпки. Потолочное перекрытие, лежащее на трубах, перемещается вместе с ними в сторону боковой стены, перекрывая оставленный зазор. Между изоляцией коллектора и обмуровкой перекрытия делается скользящий и вертикальный шов с набивкой асбестовым шнуром. Шов уплотняется сверху магnezальной обмоткой по плетеной сетке. В скользящем шве имеется тонкий металлический лист, приваренный приватками к уголку, который может перемещаться между

металлическими обкладками из другого согнутого металлического листа. В сгиб листа рекомендуется положить проволоку, имеющую диаметр, равный или немного больший толщины скользящего листа, для предотвращения возможности заклинивания листа после заделки уплотняющего устройства в бетон.

Узел уплотнения прохода потолочных труб к коллектору, показанный на рис. 6-2, б, выполнен так, что заложенные в конструкцию температурные швы допускают

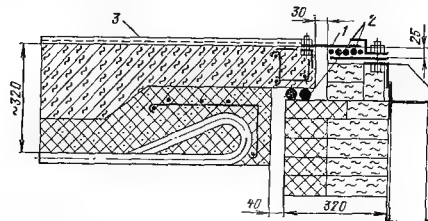


Рис. 6-3. Уплотнение скользящего типа.

1 — металлический лист; 2 — асбестовый шнур; 3 — наружное покрытие.

возможность малых относительных перемещений обмуровки перекрытия и изоляции коллектора с трубами. Этим удается избежать образования сквозных трещин в обмуровке перекрытия.

На рис. 6-3 показана схема уплотнения швов по периметру перекрытия топочной камеры скользящего типа с асбестовым шнуром. Металлические листы, образующие скользящее уплотнение, режутся через каждые 0,8—1,0 м. Разрезы служат температурными швами и воспринимают поперечные и другие возможные относительные перемещения. Особенностью данной конструкции уплотнения является возможность замены асбестового шнура при ремонте.

Уплотнение боковых степ топки и задней стены поворотной камеры по периметру перекрытия может производиться при помощи стальных компенсаторов типа, показанного на рис. 6-4. По периметру потолка делается температурный шов, по краям которого устанавливаются стальные угольники. К угольникам приваривается

компенсатор из тонкой стали толщиной 1,5—2,0 мм. Концы компенсатора в углах топки входят в колпаки с мягкой асбестовой набивкой.

На рис. 6-5 показан узел уплотнения обмуровки на участке компенсации ее температурных расширений бетонным слоем. Это уплотнение скользящего типа; оно осуществляется при помощи специальных армированных

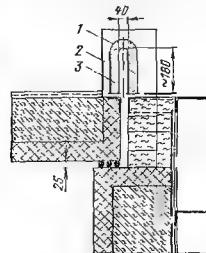


Рис. 6-4. Уплотнение с металлическим компенсатором.

1 — компенсатор; 2 — колпак; 3 — асбестовая набивка.

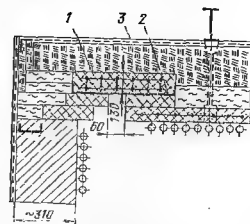


Рис. 6-5. Уплотнение скользящего типа.

1 — армированная шамотобетонная илита; 2 — асбестовая прокладка; 3 — наружное газоплотное покрытие.

шамотобетонных плит, уложенных с асбестовой прокладкой на тщательно выровненную поверхность кладки. Обмуровка благодаря наличию температурных зазоров может свободно перемещаться без повреждения бетонного слоя.

На рис. 6-6 показано несколько вариантов уплотнения узлов прохода подвесок и труб через потолочное перекрытие. Уплотнение прохода подвески показано на рис. 6-6, а; подвеска имеет преимущественно вертикальное перемещение через обмуровку потолка с наружной металлической обшивкой. В простейшем варианте уплотнение может быть выполнено из асбестовой набивки без нажимного устройства, показанного на рис. 6-6, а. Подвеска проходит в гильзе, приваренной к металлической обшивке. Набивка из асбестового шнура удерживается от выпадения при помощи волнистой проволоки, устанавливаемой на прихватках к гильзе. Действие нажим-

ного устройства, изображенного на рис. 6-б, б, аналогично действию сальника в арматуре. Уплотнение прохода подвески или трубы небольшого диаметра, имеющих перемещения в вертикальной и горизонтальной плоскостях, показано на рис. 6-б, в. Конструкция предусматривает

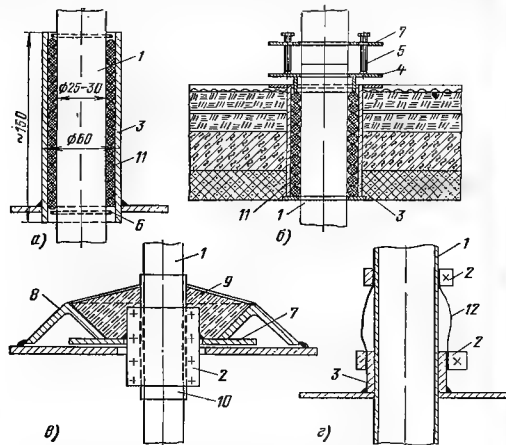


Рис. 6-б. Уплотнение проходов подвесок и труб.

а, б — уплотнения асбестовым шнуром; в — уплотнение скользящего типа; г — уплотнение асбестовой тканью; 1 — труба или подвеска; 2 — стяжной хомут; 3 — гильза; 4 — прижимная втулка; 5 — натяжной болт; 6 — проволока; 7 — шайба; 8 — рамка из угольной стали; 9 — асбестовая масса; 10 — асбестовый лист; 11 — шнур асбестовый; 12 — ткань из асбеста.

приварку стального листа к хомуту, охватывающему трубу или подвеску. По стальному листу скользит рамка из угольной стали, которая с другой стороны по периметру приварена к металлической обшивке. Внутреннее пространство рамки заполняется асбестовой массой, которая сверху оклеивается тканью или обмазывается штукатуркой по сетке. В отдельных случаях уплотнение может быть достигнуто манжетой из асбестовой ткани

(рис. 6-б, г). Манжета крепится хомутами с одной стороны к трубе, а с другой — к втулке, приваренной к металлической обшивке.

На рис. 6-7 показаны варианты уплотнения вертикального прохода трубы или подвески за счет массовой нагрузки. В первом варианте (рис. 6-7, а) к металлической обшивке, имеющей вырез для перемещения трубы, привариваются кольца 1, между которыми прокладывается асбестовый шнур. На него укладываются скрепленные между собой два металлических полукольца 2, которые

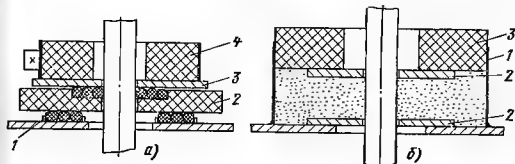


Рис. 6-7. Уплотнение за счет массовой нагрузки.

а — с помощью асбестового шнура; б — с помощью асбестовой засыпки.

с небольшим зазором (1,0—2,0 мм) охватывают трубу. Во внутреннюю выточку полукольца 2 также укладывается асбестовый шнур. Сверху помещаются сварное металлическое кольцо 3 и груз, состоящий из скрепленных между собой двух бетонных полуколец 4. Уплотнение обеспечивает вертикальное и горизонтальное перемещение трубы (подвески). Вариант уплотнения, показанный на рис. 6-7, б, основан на том же принципе, но обеспечивает большую плотность. Здесь к обшивке приваривается обечайка 1, на обшивку укладывается сварное кольцо 2. Далее производится набивка обечайки эластичным волокном или асбестовой засыпкой и кладется верхнее сварное кольцо 2 и бетонный груз 3. Особенностью этого варианта является возможность уплотнения трубы на достаточно большом участке, определяемом расстоянием (высотой засыпки) между подвижными металлическими кольцами.

Надежными, но более сложными уплотнениями узлов прохода труб или подвесок через обмуровку являются линзовые компенсаторы (рис. 6-8), которые применяются, как правило, для труб большого диаметра.

Уплотнение допускает вертикальное перемещение трубы. Линзовый компенсатор одним концом приваривают к втулке, прикрепленной к наружной металлической обшивке; другой конец линзового компенсатора приваривают через торцевой лист к трубе. Труба в районе шамотобетона обернута толсм, после выгорания которого возникает зазор для перемещения трубы. При больших перемещениях трубы применяют компенсаторы с большим числом линз.

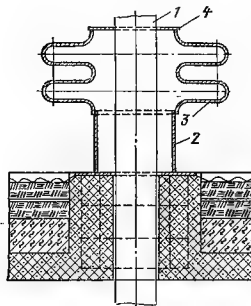


Рис. 6-8. Уплотнение труб линзовым компенсатором.

1 — труба; 2 — гильза; 3 — линзовый компенсатор; 4 — торцевой лист.

путем применения цельносварного короба («теплого ульяка») над всем потолком котла. Такое уплотнение потолка предполагает большую герметичность и снижение притоков холодного воздуха.

Узлы уплотнения обмуровки топочной камеры

Уплотнение температурного шва между натрубной обмуровкой топки и накаркасной обмуровкой поворотной камеры показано на рис. 6-9, а. Уплотнение производится асбестовым шнуром почти по всей толщине обмуровки и на участке, вынесенном за обмуровку. Уплотнение состоит из фигурного листа, который образует продолжение шва на боковой стене газохода и позволяет уплотнить асбест за счет поджатия шпильки. В листе про-

резаны отверстия, обеспечивающие его перемещение по вертикали относительно шпильки, приваренных к неподвижному щиту обмуровки поворотной камеры. Горизонтальный разъем шва (рис. 6-9, б) дополнительно уплотняют асбестовой набивкой, заключенной внутрь асбестовой ткани АТ-7, концы которой прикрепляют при

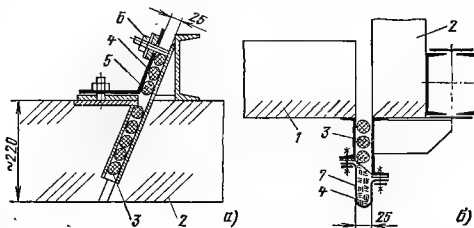


Рис. 6-9. Уплотнение шва между натрубной и накаркасной обмуровкой.

а — вертикального; б — горизонтального; 1 — ограждение топки; 2 — ограждение поворотной камеры; 3 — уплотнение по толщине обмуровки; 4 — дополнительное уплотнение; 5 — фигурный лист; 6 — прижимная шпилька; 7 — асбестовая ткань АТ-7.

помощи планок и болтов к существующим металлоконструкциям обмуровки топки и щита, допускающих взаимные перемещения.

На рис. 6-10 показана конструкция уплотнения скатов холодной воронки в местах их сопряжения с боковыми экранами котла. На трубы боковых экранов привариваются косынки, на которые укладывается опорный угольник. К трубам наклонных скатов воронки на опорный угольник укрепляется стальной лист шириной 500—600 мм и толщиной 4 мм. Последний не дает трубам бокового экрана отходить от скатов воронки и является одновременно уплотнением данного узла.

На рис. 6-11 показаны два варианта уплотнения углов топочной камеры с натрубной обмуровкой. Благодаря тому, что трубы в углах топки разведены под углом 45° к плоскостям боковых стен, их шаг увеличивается почти в 1,5 раза. При относительном шаге экранных труб $s/d > 1,1$, т. е. при увеличении шага труб в углах топки,

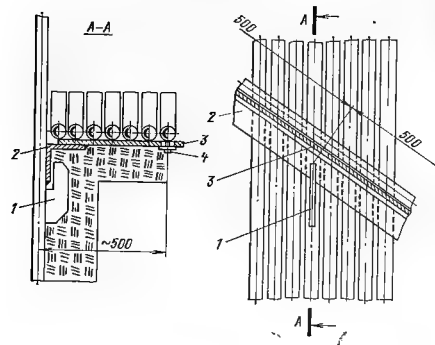


Рис. 6-10. Уплотнение скатов холодной воронки натрубной обмуровки.

1 — косынка; 2 — опорный угольник; 3 — стальной лист; 4 — крепление листа.

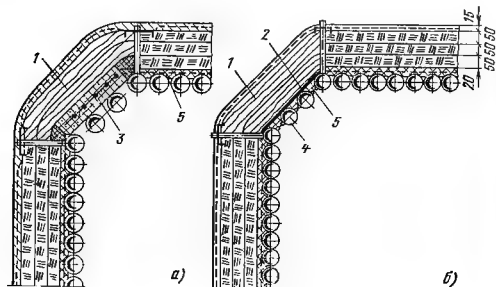


Рис. 6-11. Уплотнение угла топки.

а — шамотобетонной плитой; б — приваркой к трубам стальных полос и листа; 1 — минераловатные матрасы; 2 — металлическая обшивка; 3 — шамотная плита; 4 — трубы с приваренными ребрами; 5 — защитная обшивка

требуется дополнительная защита натрубной обмуровки. Для защиты могут применяться армированные шамотобетонные плиты, которые изолируют минераловатными матрасами или напыляемой изоляцией, как показано на рис. 6-11, а. Применение эластичной изоляции в этом случае необходимо для уменьшения возможности образования трещин при деформации углов от температурных расширений. В тех случаях, когда шаг труб позволяет производить приварку полос-ребер, уплотнение углов топки может производиться при помощи стального листа за трубами с приваркой к трубам ребер из стальных полос. Такой вариант уплотнения показан на рис. 6-11, б. Высота ребер для предотвращения их обгорания не должна превышать 20—25 мм. Для снятия температурных напряжений в трубах и ребрах последние имеют прорезы на полную ширину (до стенки трубы) примерно через 100 мм.

Уплотнение горелок

При проектировании котлов должно уделяться особое внимание уплотнению мест соединения горелок с топкой. Эксплуатация и испытания показывают, что присосы воздуха через неплотности горелок могут составлять около 50% общего значения присосов в топку. Уплотнение горелок, неподвижно закрепленных на каркасе котла и мест сопряжения горелок с натрубной обмуровкой вертикально перемещающейся топкой, представляет определенные трудности.

Простейший вариант уплотнения скользящего типа дает возможность производить ремонт и замену уплотняющего материала; такой вариант показан на рис. 6-12. Горелка неподвижно укреплена на каркасе котла. На экранных трубах укреплена металлическая рама, которая перемещается вместе с ними. Между рамой и фланцем горелки по всему периметру имеется скользящее уплотнение с набивкой асбестовым шнуром. Последний удерживается от выпадения стальной проволокой диаметром 4—5 мм.

На рис. 6-13 показаны возможные варианты узлов уплотнения горелок, где усилие создается за счет предварительно сжатых пружин. Неподвижный фланец горелки 1 закреплен на каркасе котла, фланец 2 соединен с экранами топки. Промежуток между фланцами

(рис. 6-13, а) уплотняется компенсатором 3 из стали ($\delta=0,5$ мм). Компенсатор защищается листом 4. Подвижную часть уплотняют асбестовым шнуром, который укладывается в паз планки 5. Уплотнение асбеста производится прижимным устройством, состоящим из штока 6, входящего в стакан 7, и пружины 8. Планка 5 разрезана по своей длине; на каждый участок планки длиной 600—800 мм устанавливают по два прижимных устройства. Наиболее слабым местом уплотнения является асбестовый шнур, который быстро изнашивается и теряет свои упругие свойства, снижая плотность узла. На рис. 6-13, б показано уплотнение узла горелок с помощью разрезных чугунных колодок 3. Каждая колодка прижимается к подвижному фланцу 2 с помощью устройства 4. Плотность между фланцами 1 и 2 достигается за счет прижатия колодок пластинчатыми пружинами 5 к угольнику 6. Из рассмотренных вариантов узлов уплотнения горелок более надежным является уплотнение с чугунными колодками. Однако и оно не всегда обеспечивает плотность из-за коробления подвижного фланца 2.

Рис. 6-12. Уплотнение горелки со скользящим уплотнением.

1 — подвижная часть экранов; 2 — неподвижная часть горелки; 3 — асбестовое уплотнение; 4 — прижимные колодки; 5 — проволока.

тикальных перемещений горелок, достигающих у современных мощных котлов 130—150 мм. Подводящие к горелкам воздуховоды, пылепроводы и газопроводы должны допускать эти перемещения путем установки в них систем компенсаторов или за счет самокомпенсации. Существуют схемы крепления горелок, разработанные СКБ ВТИ и Барнаульским котельным заводом, где на-

грузка от массы передается на экранные трубы. Установка горелок на новых котлах с натрубными обмуровками может осуществляться с передачей нагрузки от горелок на экранные или на опускные трубы. Последние должны проходить вблизи горелок и иметь крепления,

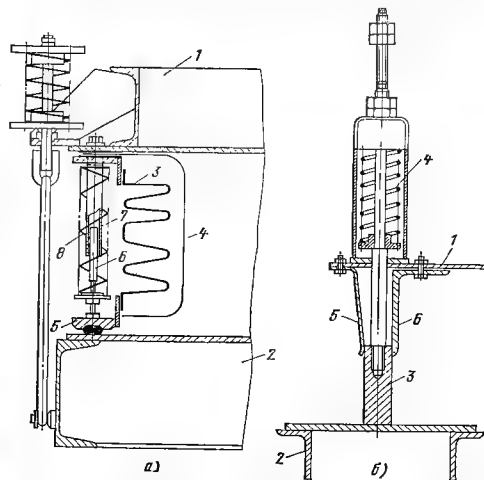


Рис. 6-13. Уплотнение горелок с поджатием пружинами.

а — с помощью асбестового шнура; б — с помощью чугунных колодок.

допускающие восприятие дополнительных нагрузок. Одновременно в местах установки горелок должны быть обеспечены условия для одинаковых температурных перемещений экранов и опускных труб.

Нагрузка, создаваемая одной горелкой производительною 5—10 т/ч по пыли с учетом ее изоляции и подводящих пылевоздухопроводов, составляет от 5 до 8 т. Для распределения этой нагрузки на значительное число труб к экранным трубам привариваются специальные элементы. Так как центр тяжести горелки распо-

ложен вне плоскости экрана, то создается момент, изгибающий трубы экрана. Поскольку жесткость труб экрана мала, то для того, чтобы избежать возникновения недопустимых деформаций труб, делают так, чтобы момент передавался на поясные балки жесткости, которые устанавливают на экране по высоте через каждые 2,5-3,0 м. Экрайные трубы и все крепления, примыкающие к ним, а также поясные балки должны быть рассчитаны с учетом дополнительной нагрузки.

Для котла ТП-100 Луганской ГРЭС, имеющего два ряда горелок, была осуществлена установка горелок непосредственно на экранных трубах (рис. 6-14, а). Для передачи нагрузки от горелок вплотную к трубам, на косынках, расположенных через одну трубу, поставлен швеллер 1. К несущему швеллеру через шарнирную тягу 2 подвешена рама 3. Рама несет две горелки, которые прикреплены к ней. Горизонтальные усиления, возникающие от момента по концам рамы, передаются на поясные балки топки. Нижний конец рамы свободно перемещается по вертикали и прикреплен к нижнему поясу болтами через овальные отверстия. В раме горелок установлены поперечные швеллеры 4, притягивающие ее к экрану. Для одинакового перемещения горелок соответственно тепловому удлинению труб экрана внутрь вертикальных элементов рамы пропущены хорошо изолированные снаружи, шунтированные по рабочей среде от опускных труб две трубки меньшего диаметра 5.

При реконструкции котла ТП-100 Старобешевской ГРЭС (рис. 6-14, б) была принята установка горелок «треугольником». Несущие швеллеры 1 при помощи косынок через одну трубу прикреплены к экрану. Будучи изолированы совместно с экраном, они имеют одинаковые с ним температуру и перемещения. Горелки при помощи опор 2 прикрепляют к несущим швеллерам 1. Усилия от момента передается через свободно перемещающиеся по вертикали стойки 3 на поясные балки топки. Приведенная схема проста и не требует обогрева зодак.

Для новых котлов Барнаульский котельный завод принял схему установки горелок в один ряд, исключаящую возникновение момента из-за горизонтальных усилий. В этой схеме, показанной на рис. 6-15, а, сама горелка является двухопорной балкой, концы которой подвешены при помощи блоков и тросов к двум опорам. Одна опора является подвижной (на экранных трубах),

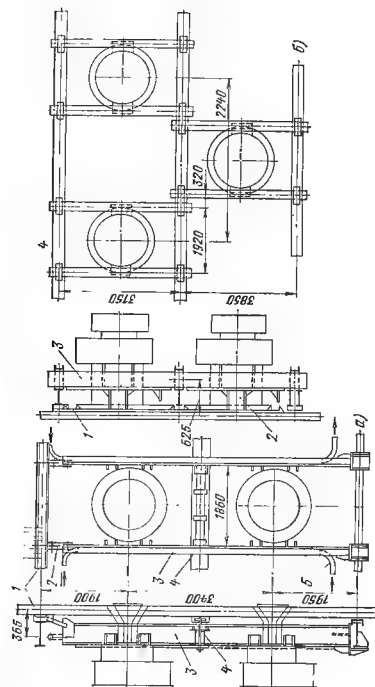


Рис. 6-14. Схема установки горелок на экраны с помощью рам.
а — в два ряда; б — треугольником.

другая неподвижной (на каркасе котла). Система работает таким образом, что если опора горелки, укрепленная на экране, перемещается, то это перемещение передается при помощи троса через направляющий блок концу каната, прикрепленному к другому концу горелки. Горелка всегда находится в горизонтальном поло-

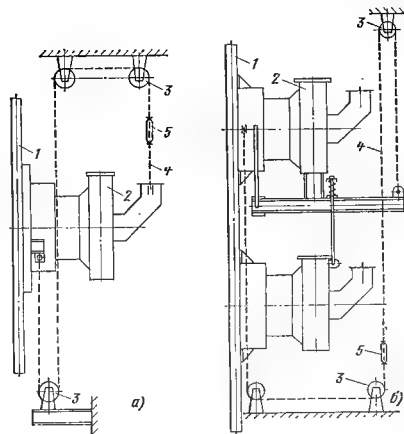


Рис. 6-15. Схема установки горелок на экраны.

а — однорядная; б — двухрядная; 1 — экран; 2 — горелка; 3 — блоки; 4 — трос; 5 — натяжение троса талрепом.

жения и следует за перемещением экрана. Преимущество этой схемы состоит в том, что нагрузка от горелки распределяется между экраном и каркасом, а момент отсутствует. В схеме желательно иметь два комплекта устройств, расположенных с каждой стороны горелки. Регулировка натяжения тросов производится при помощи талрепов. Для горелок, расположенных в два ряда (рис. 6-15, б), уравновешенная система крепления при помощи блоков и тросов выполняется так, что некото-

рые горелки являются несущими. Одна из опор нижнего ряда горелок прикрепляется к верхнему ряду при помощи тяги с пружиной. Верхний ряд горелок передает нагрузку на экран и через неподвижно установленную систему блоков на каркас котла. Схема с уравновешенной системой крепления может применяться и при реконструкции топочных камер. В такой схеме необходима тщательная проверка натяжения тросов в период монтажа и при эксплуатации по мере их вытягивания под нагрузкой.

Уплотнение прохода труб конвективной шахты

Экономичность работы котла, как известно, зависит от тепловых потерь с уходящими газами. При конструировании котлов стремятся к снижению температуры уходящих газов за счет развития конвективных поверхностей нагрева. Поэтому присосы воздуха в конвективную шахту и связанное с этим дополнительное снижение температуры уходящих газов недопустимы.

Наибольшие трудности представляет уплотнение узла прохода змеевиков через ограждение конвективной шахты, так как приходится предусматривать тепловое удлинение самих труб (продольное перемещение) и удлинение коллекторов, которое приводит к перемещению труб в поперечном направлении.

Узел уплотнения прохода змеевиков конвективной поверхности нагрева через ограждение конвективной шахты показан на рис. 6-16. Продольное перемещение труб уплотняется асбестовым шнуром, который закладывается между трубой и манжетой, поперечное — компенсируется температурными швами в торкрет-бетоне. На рисунке показан комбинированный вариант уплотнения

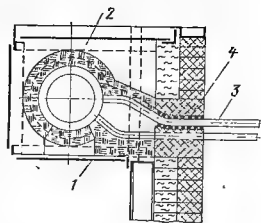


Рис. 6-16. Узел уплотнения прохода змеевиков через ограждение конвективной шахты.

1 — металлическая обшивка; 2 — изоляция камеры; 3 — проход змеевиков через обмуровку; 4 — уплотнение асбестовым шнуром.

прохода труб. Помимо обычного уплотнения, состоящего из изоляционного слоя и наружного покрытия с обмазкой по сетке, установленна металлическая обшивка, плиты привариваются к обшивке газохода. Уплотнения, имеющие только защитную наружную газоплотную обмазку, плохо зарекомендовали себя в эксплуатации, так как надежно уплотняющих мастик подобрать не удастся.

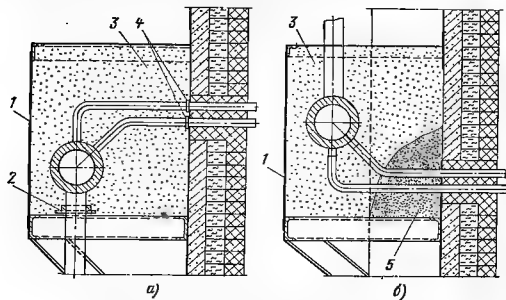


Рис. 6-17. Уплотнение прохода змеевиков через ограждение засыпкой.

а — уплотнение в районе нижнего коллектора; б — уплотнение в районе верхнего коллектора; 1 — металлический короб; 2 — свободно надета манжета; 3 — засыпка сухим песком; 4 — асбестовый шнур; 5 — асбестовая засыпка.

Уплотнение прохода труб конвективных поверхностей нагрева через ограждение при наличии наружного металлического короба может быть достигнуто путем применения засыпки из песка. В этом случае внутри короба пустот не будет, как при засыпке асбестовой пушкой или при заделке минеральной ватой. Конструкция такого уплотнения для нижнего коллектора показана на рис. 6-17, а. Для предотвращения утечки песка в газоход трубы в местах их выхода из кладки в короб следует уплотнять асбестовым шнуром. Манжета 2 исключает возможность утечки песка через овальное отверстие в коробе, предназначенное для прохода отводящей трубы.

Более просто решается узел уплотнения с помощью засыпки для верхних камер конвективных поверхностей

нагрева, расположенных в коробе или вынесенных за его пределы (рис. 6-17, б). На участке прохода труб через обмуровку применяют асбестовую засыпку, а на входе труб в коллектор дополнительное уплотнение не требуется. Проход коллектора через металлический короб может осуществляться по одному из показанных ранее типов уплотнения единичной трубы, например, с помощью линзового компенсатора.

На рис. 6-18 показано уплотнение прохода сборного коллектора (трубы большого диаметра) через ограждение с обеспечением его перемещения не только в осевом, но и в перпендикулярном направлении. К металлической обшивке ограждения приваривается плита 1, внутреннее отверстие в которой обеспечивает необходимое перемещение коллектора в плоскости, перпендикулярной его оси. На коллектор устанавливается разъемная прямоугольная плита 3, две половины которой скрепляются болтами. Плита 3 имеет специальные выточки 8, в которые закладывается уплотняющий материал 8, например асбестовая набивка с графитом АГ-1 диаметром 13 мм (ГОСТ 5152-77). Плита 3 прижимается к плите 1 с помощью прижимов 2 винтами 5. Для возможности разборки узла уплотнения прижимы 2 крепятся болтами 6 к плите 1. Уплотнение по оси трубы достигается разъемным фланцем 4, который крепится к плите 3 шпильками 7 и прижимает уплотняющий материал 8 в выточке плиты 3.

Однако наиболее эффективна борьба с присосами в конвективной шахте путем размещения коллекторов перегревателей и экономайзера в газоход. Проход коллекторов и труб большого диаметра через ограждение вы-

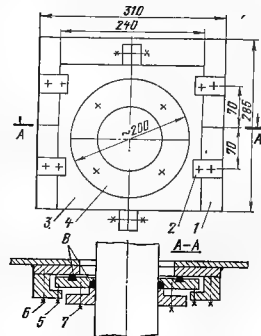


Рис. 6-18. Уплотнение прохода коллектора, обеспечивающее его перемещение в горизонтальном и осевом направлениях.

полняется с сальниковым уплотнением, линзовым компенсатором или другим типом уплотнения, применяемого для единичной трубы. Часто присосы происходят через лючки и лазы. Типовые конструкции чугунной гарнитуры имеют неплотности, особенно лючки гляделок, где отсутствуют асбестовые уплотнения и прижимающие крышки устройства. Крышки лазов имеют более надежные прижимные устройства. Для более надежного уплотнения ремонтных лазов многие станции закладывают их кирпичом.

Уплотнение обмуровки обшивкой стальным листом по трубам

Уплотнение натрубной обмуровки топочной камеры при выполнении экранов из гладких труб может быть достигнуто обшивкой стальным листом непосредственно по трубам («горячая» обшивка). Как уже отмечалось, выполнение такой обшивки возможно при условии тесного шага между экранными трубами ($s/d \leq 1,1$). Температура листа обшивки при таких s/d лежит в пределах 450—500° С. Это обеспечивает окалиностойкость углеродистой стали в окислительно-восстановительной среде топочных газов. В тех местах, где трубы имеют больший шаг, необходимо выполнение защиты обшивки — приварка к трубам плавников, нанесение слоя защитной огнеупорной массы и т. д.

На рис. 6-19 показан узел обшивки листами топочной камеры с натрубной обмуровкой котла ТП-100. Проект обшивки выполнен СКБ ВТИ для реконструкции обмуровки котла; обшивка состоит из отбортованных листов I шириной 512 мм, чтократно шагам между экранными трубами. На трубах через каждые 500 мм по вертикали приварены планки 60×40×4 мм 2, около которых обжимаются борта листов (узел I). Углы отбортованных листов срезаются; соединение отбортованных листов (узел II) осуществляется за счет шайбы 3, которая подтягивается к экрану и приваривается к планке 2, а по периметру к листам I. К планкам 2 привариваются стержни 4 для крепления изоляции. Отбортованные листы свариваются по гребню и образуют прочную решетку, рассчитанную на возможное повышение давления в топке до 500 мм вод. ст. При разборке обшивки сварка по гребню срезается и листы вынимаются; после ремонта экранов

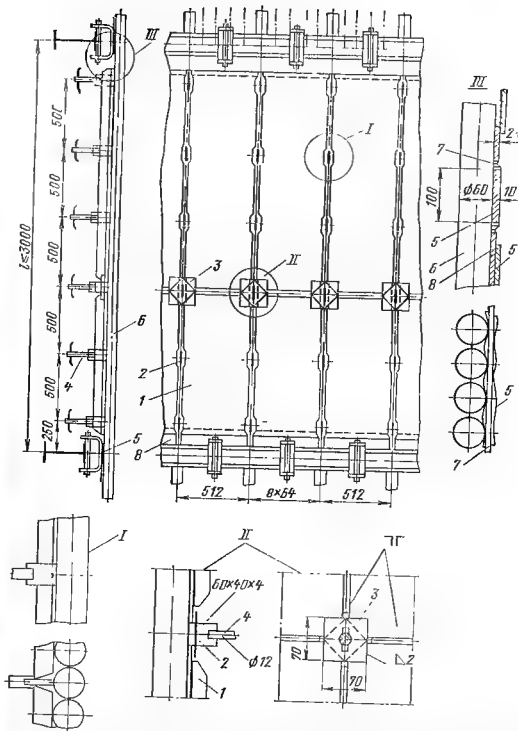


Рис. 6-19. Стальная обшивка по трубам топки котла.

I, II, III — узлы крепления обшивки соответственно: к планке (боковое соединение листов); при угловом соединении листов; в местах крепления полных блоков.

листы могут быть вновь установлены на место. Для уплотнения обшивки в местах прикрепления поясных балок (узел III) на волнистую полосу 5, приваренную к трубам 6, укладывается проволока 7 диаметром 6 мм, к которой впрыток устанавливаются полосы 8 из листа толщиной, равной толщине обшивки (2—3 мм). Полосы делаются шириной 150—200 мм для

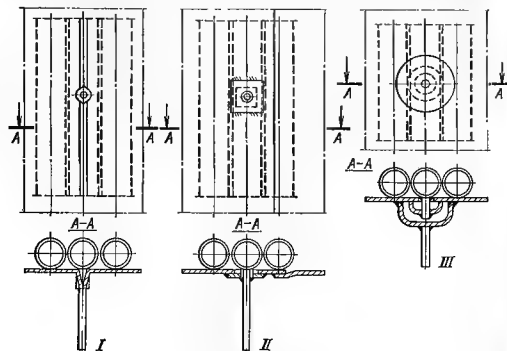


Рис. 6-20. Узлы крепления обшивки, применяемые при реконструкции обмуровок.

компенсации возможных отклонений против проектных размеров при монтаже поясных балок. Проволока и концы полос обвариваются для плотности; на полосы сверху устанавливаются отбортованные листы. Сварка тонких листов производится проволокой в среде углекислого газа. Наиболее часто встречающиеся узлы крепления обшивки, применяемые при реконструкции обмуровок котлов, показаны на рис. 6-20. Крепление отбортованных листов на стержнях, приваренных к трубам (узел I), практически не отличается от крепления с помощью приварных полос, показанных на рис. 6-19. На рис. 6-20 показано крепление к трубам металлической обшивки без отбортовки (узел II). К экрану обшивку прижимают при помощи шайб, которые обваривают по периметру и приваривают к стержням, предназначенным для крепления

тепловой изоляции. При таком креплении обшивка имеет меньшую жесткость, чем обшивка с отбортованными листами. Крепление обшивки, которое допускает перемещение труб относительно листов без нарушения плотности, показано на рис. 6-20 (узел III), но такое крепление требует штампованных деталей. На трубы с приваренными к ним короткими стержнями надеваются листы обшивки с отверстиями, допускающими перемещение труб. На стержень надевается и с ним сваривается колпачок, который прижимает лист к трубе; колпачок не сваривается с листом и может скользить по его плоскости. Над малым колпачком устанавливают большой колпачок, который приваривают по периметру к листу. Для крепления изоляции к наружному колпачку приваривают стержень. Такой тип крепления обшивки может быть рекомендован для экранов, трубы которых имеют различные температуры. Лучшими конструкциями уплотняющей обшивки, лежащей на трубах, являются обшивка с отбортованными краями листов и обшивка, допускающая относительное перемещение труб.

Конструкция уплотнения топки котла за счет металлической обшивки по трубам относительно легко осуществима на котлах с естественной циркуляцией и значительно труднее из-за различного расширения труб экранов на прямоточных котлах. При внедрении плавниковых труб, сваренных между собой в цельносварные газоплотные панели, конструкция уплотнения экранов топкой металлическим листом по трубам практически исчезает. Такие уплотнения находят применение на котлах малой производительности. Применение стального листа в трубных обмуровках в сочетании с новыми конструктивными узлами распространено лишь при реконструкции котлов.

Глава седьмая

МЕМБРАННЫЕ ГАЗОПЛОТНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВ

7-1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОГРАЖДЕНИЙ. ПРЕИМУЩЕСТВА ОГРАЖДЕНИЙ ГАЗОПЛОТНЫХ КОТЛОВ

После применения тяжелых и облегченных кирпичных кладок ограждения котлов совершенствовались по двум направлениям: создание накаркасных щитовых об-

муровок с использованием жаростойких бетонов и легких натрубных обмуровок. Появление котлов с цельносварными экранами позволило перейти к легким теплоизоляционным конструкциям. Такая замена стала возможной из-за отсутствия контакта обмуровки с фаломом.

В СССР впервые экранные поверхности нагрева, выполненные в виде труб с приваренными к ним продольными ребрами, появились в конце 30-х годов [7-1]. К трубам диаметром 83×4 мм приваривались продольные ребра с размером 30×6 мм. Однако некачественная приварка и неправильный выбор размеров и формы ребер привели к появлению трещин в ребрах и свищей в трубах, поэтому экраны были демонтированы.

В последующих работах по созданию газоплотных котлов котлостроительными заводами совместно с институтами было запроектировано и смонтировано несколько котлов, рассчитанных на работу под наддувом с различным конструктивным оформлением газоплотных ограждений. Котлы имели стальную обшивку по трубам, цельносварные газоплотные панели из гладких труб с вваркой между ними полос. Опыт создания и освоения указанных котлов позволил выявить достоинства и недостатки ограждений с обшивочными листами и с газоплотными панелями. Рассматривая применение газоплотных экранов, следует более подробно остановиться на их преимуществах, связанных с обмуровкой котлов [7-2, 3].

Применение газоплотных экранов дает следующие преимущества:

1. Значительно снижаются массовые характеристики ограждения, поскольку в современных котлах большой производительности масса обмуровки настолько велика, что ее влияние на конструкцию каркаса требует специального рассмотрения.

2. Сокращаются сроки и трудозатраты на монтажные и ремонтные обмуровочные работы. Опыт показывает, что при ремонтах поверхностей нагрева котлов с обычной обмуровкой на ее долю приходится 40—50% всего времени, затрачиваемого на ремонт.

3. Резко уменьшается аккумулялирующая способность ограждения, что усиливает маневренность энергоблока, сокращая время пусков и остановов.

4. Уменьшается опасность увлажнения и разрушения изоляции газоплотных экранов при обдувке паром и обмывке экранов водой.

5. Снимаются вопросы, связанные с технологией изготовления жаростойкого бетона, режимами сушки и первого разогрева обмуровки.

6. Значительно упрощается изоляция (пыляемая или плитная) газоплотных экранов, которая крепится к экранам при помощи шпилек; наружная поверхность изоляции покрывается защитным слоем.

Жесткость конструкции газоплотных экранов повышает стойкость и срок службы набивных футеровочных масс в топках с жидким шлакоудалением.

Таблица 7-1

Характеристики стен топки

Показатели (на 1 м² ограждения)	Наружная температура газа		
	Наружная температура обмуровки	Наружная температура газа	Изоляция экрана
Размеры и шаг труб экрана $d \times \delta (s)$, мм	32×6(36)	32×6(36)	32×6(46)
Масса металла труб, кг/м²	108	108	100
Толщина слоя жаростойкого бетона, мм	100	40	—
Толщина слоя тепловой изоляции, мм	190	160	150
Масса ограждения без отделочного слоя, кг/м²	255	107	33
Теплоемкость металла труб, ккал/м²	5950	5950	5500
Теплоемкость обмуровки (изоляция), ккал/м²	26 100	10 700	1980
Суммарная теплоемкость ограждения, ккал/м²	32 050	16 650	7480
Температура внутренней поверхности обмуровки, °C	600	600	500
Температура наружной поверхности обмуровки, °C	53	53	50
Тепловые потери в окружающую среду, ккал/(ч·м²)	280	280	250

Примечание. В расчетах принято, что средняя температура материала при нагреве: °C: металла 500, бетона 500, изоляции 300. Плотность материала 225; удельная теплоемкость металла 0.11, обмуровки 0.2 ккал/(кг·°C).

В табл. 7-1 приведены сравнительные данные о массовых характеристиках, теплоемкости и теплопроводности стен топок с наварками шитовой обмуровки и изолирующей цельносварных газоплотных экранов.

7-2. КОНСТРУКЦИИ УЗЛОВ ЦЕЛЬНОСВАРНЫХ ГАЗОПЛОТНЫХ ЭКРАНОВ

Существует несколько способов изготовления цельносварных газоплотных экранов: из плавниковых труб металлургического производства, из труб с приваренными

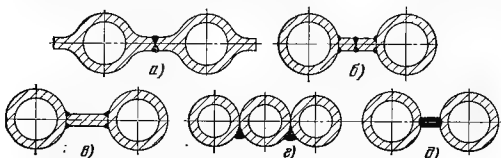


Рис. 7-1. Способы изготовления цельносварных экранов.

а — из плавниковых труб; б — из гладких труб с приваренными плавниками; в — из гладких труб с варкой полосы; г — из сваренных между собой труб; д — из гладких труб с наплавкой металла.

плавниками, из гладких труб с варкой между ними проставок, из гладких труб с наплавкой между ними металла и из сваренных между собой гладких труб. Поперечные разрезы таких экранов показаны на рис. 7-1. Наиболее широко распространены способы изготовления цельносварных экранов из плавниковых труб металлургического производства и из гладких труб с варкой между ними проставок или с приваренными плавниками [7-4]. Геометрическая форма плавников труб металлургического производства может быть прямоугольной и трапециевидной с симметричным расположением плавников по оси трубы и со смещением.

Проведенные в ЦКТИ работы [7-5], посвященные выбору способа изготовления цельносварных экранов котлов сверхкритического давления, показали, что при отсутствии отечественных плавниковых труб перспективным является изготовление экранов путем двусторонней приварки проставок к гладким трубам под слоем флюса.

На котлостроительных заводах ЗнО, ТКЗ, БКЗ и БелКЗ освоены как изготовление газоплотных панелей из плавниковых труб металлургического производства, так и способ варки полосы между гладкими трубами.

Герметичность ограждения — одно из основных преимуществ газоплотных котлов — достигается за счет цельносварных экранов, поэтому при их проектировании конструкциям соединения узлов газоплотных экранов уделяется основное внимание. Для обеспечения герметичности важно создание надежных узлов уплотнения прохода труб через ограждения, стыковки экранов, выхода экранных труб в сборные коллекторы и т. д.

Газоплотность котлов, предназначенных для работы под наддувом, обеспечивается в большинстве случаев применением двух контуров уплотнений: надежной сваркой в единую камеру всех газоплотных панелей и системой дополнительных газоплотных сварных коробов, которые привариваются к экранам в местах возможных протечек газов через уплотнения первого контура, например на потолке котла, в узлах разъемов экранов топки и т. д. Во второй уплотняющий контур может подаваться воздух дутьевым вентилятором. Давление уплотняющего воздуха должно несколько превышать избыточное давление в топке; это позволяет защитить помещение котельной от продуктов сгорания в случае неплотностей в цельносварной топке.

Ниже приводятся некоторые конструктивные решения основных узлов цельносварных экранов, предназначенных для обеспечения плотности конструкции. Эти узлы постоянно совершенствуются по мере накопления опыта их эксплуатации и технологии изготовления. Узлы, предназначенные для обеспечения прочности цельносварных экранов, например балки жесткости, и варианты их крепления к экранам не рассматриваются.

На рис. 7-2 представлены варианты углового соединения мембранных панелей топки или конвективной шахты котла. При применении в угловой сварке газоплотных экранов гладких труб с учетом ручной сварки их берут с толщиной стенки не менее 6 мм.

На рис. 7-3 показано соединение вертикального и наклонного участков газоплотных экранов с помощью клиновидных вставок 3 и вертикального и горизонтального экранов с помощью приварной гребенки 3. В последнем случае соединение может быть выполнено встык или вна-

хлестку. Узлы прохода перлитных и аустенитных труб через мембранную стенку показаны на рис. 7-4. Обварка труб при проходе через мембранную стенку допустима при разнице температур металла труб, не превышающей

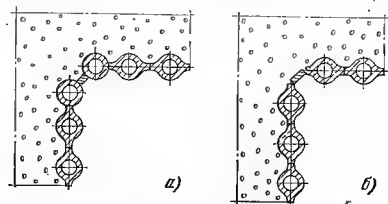


Рис. 7-2. Угловой стык панелей.

а — с гладкими трубами; б — с плавниковыми трубами.

50—75°C. При большей разнице температур трубы не свариваются; для обеспечения газоплотности устанавливается наружная металлическая обшивка, а выходы камеры уплотняются линзовым компенсатором. На рис. 7-5 показаны конструкции узла прохода гладких труб ширмового пароперегревателя через плавниковую экран

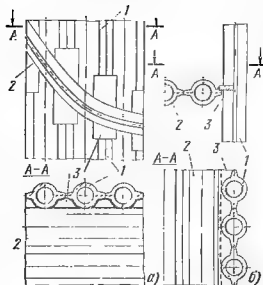


Рис. 7-3. Соединение цельносварных экранов.

а — вертикального с наклонным; б — вертикального с горизонтальным; в) — плавниковый вертикальный экран; 2 — плавниковый горизонтальный или наклонный экран; 3 — приварная уплотняющая деталь.

ную поверхность. К трубам плавникового экрана (вариант а) привариваются гофрированные коробки по одной на каждый ряд труб. К коробке сверху приваривается линзовый компенсатор, к которому через втулки

привариваются трубы ширмового пароперегревателя. Гофры на коробке делаются для компенсации различных температурных расширений участков цельносварной коробки, примыкающих с одной стороны к экрану, а с дру-

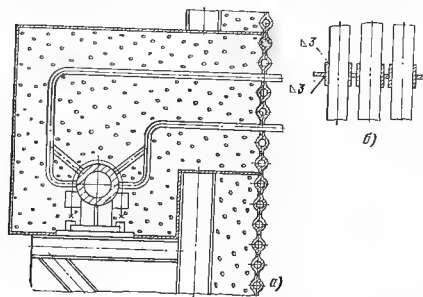


Рис. 7-4. Узел прохода труб через цельносварной экран.
а — перлитных; б — аустенитных труб.

гой контактирующих с наружным воздухом. Вариант б представляет более простую конструкцию узла уплотнения прохода труб через плавниковую экранную поверхность. В этом случае цельносварная коробка имеет поперечные разрезы, в которые вставляются U-образные компенсаторы. Эти компенсаторы значительно проще в изготовлении по сравнению с линзовым и позволяют одновременно отказаться от гофрировки коробок.

Уплотнение разводов труб в плавниковом экране показано на рис. 7-6. Освоенные на котельных заводах гнбов плавниковых труб в плоскости плавника может значительно упростить выполнение этого узла.

Требуется разработки надежного уплотнения узел стыковки газоплотных панелей на участке разъема экрана и на входе плавниковых труб в сборные коллекторы. На котле ТКЗ ТГМП-324 разъемы топки (стык НРЧ—СРЧ, СРЧ—ВРЧ) были уплотнены приваркой к плавниковым трубам фигурных планок толщиной 6 мм из стали 12Х1МФ, установленных в плоскости плавников труб

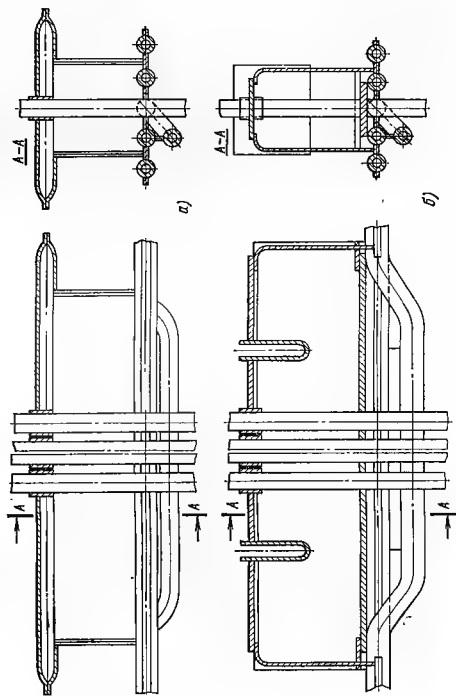


Рис. 7-5. Уплотнение прохода труб через плавниковый экран.

а — с помощью коробки с линзовым компенсатором; б — с помощью коробки с U-образными компенсаторами.

(рис. 7-7, а). Вывод труб экранов к коллекторам выполнен на разных отметках через две трубы. Для защиты планок был установлен дополнительный экран, покрытый огнеупорной обмазкой, из двух сваренных между собой плавниковых труб, включенных в общую схему котла. Опыт эксплуатации таких уплотнений показал их

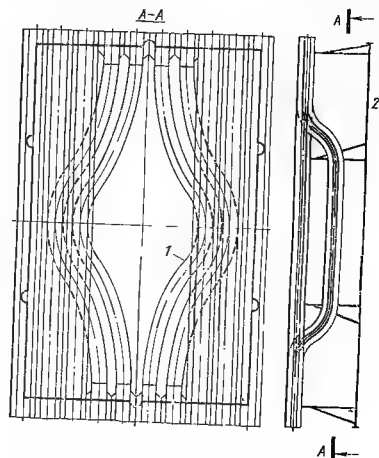


Рис. 7-6. Разводки в газоуплотненных экранах.

1 — гнбы из гладких труб; 2 — уплотняющая металлическая коробка с гофрами.

ненадежность, а расчеты подтвердили нерациональность такого узла уплотнения.

На ЗНО были проведены стендовые исследования температурного режима работы аналогичного узла уплотнения при смещении уплотняющей фигурной планки в необогреваемую часть экрана (рис. 7-7, б) и при выводе труб в коллектор через одну и через две трубы. Для создания плотности устанавливались боковые пластины, которые приваривались к смещенной планке и

плавникам расположенных рядом прямых труб, образуя цельносварную коробку, через которую осуществляется передача нагрузки от нижних экранов на верхние. Недостатком данной конструкции следует считать появление изгибающего момента при передаче массовой на-

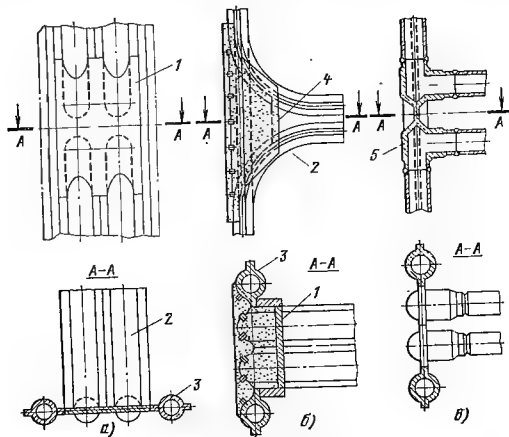


Рис. 7-7. Стык плавниковых экранов на участке выхода труб с сборным камерам.

1 — фигурная планка; 2 — участокгиба трубы; 3 — прямой участок трубы; 4 — боковые уплотняющие планки; 5 — ковано-сверленные колена.

грузки на экраны. При смещении уплотняющей планки примерно на 40 мм ее температура значительно снижается. Превышение максимальной температуры планки над температурой рабочей среды при $q \approx 10^5$ ккал/(ч·м²) составляло около 130°C. Повторное испытание панели проводилось при той же тепловой нагрузке после укрытия уплотняющей планки карборундовой массой на связке из ортофосфорной кислоты. Для удержания массы к трубам были приварены шипы из стали Х6СЮ диа-

метром 10 мм, высотой 15 мм. При укрытии планки ее температура не превышала температуру лобовой точки неутепленной плавниковой трубы. Набивная масса при небольшом количестве шипов охлаждается недостаточно, что может привести к ее разрушению при более высоких тепловых потоках. В области умеренных тепловых потоков [до 10^5 ккал/(ч·м²)] данная конструкция уплотнения экранов может применяться без утепления уплотняющей планки.

Представляет интерес разработанная в ЧССР конструкция узла разьема (рис. 7-7, в), в которой использованы кованые или литые колена [7-5]. Ковано-сверленные колена свариваются друг с другом по горизонтали и с расположенным рядом в вертикальной плоскости плавниковыми прямыми трубами.

В газоплотных котлах большое внимание следует уделять плотности гарнитуры, которая должна быть специальной конструкции. Жаропроочное стекло 1 гляделки (рис. 7-8) охлаждается струей сжатого воздуха через патрубков 2, образуя воздушную завесу. Опыт эксплуатации газоплотных котлов показал, что воздушная завеса не обеспечивает защиту стекла гляделки от повреждения излучением из топочного объема. Поэтому необходимо устанавливать защитную заслонку 3, которая открывается в момент пользования гляделкой.

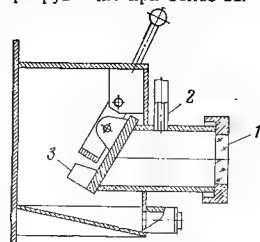


Рис. 7-8. Гляделка газоплотных котлов с защитной заслонкой.

7-3. КОНСТРУКЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОПЛОТНЫХ ЭКРАНОВ КОТЛОВ

В качестве изоляции для газоплотных котлов могут применяться мягкие или твердые плиты и напыляемая изоляция.

Мягкая изоляция из минеральной ваты и вулканитовые плиты не распространены в ограждениях газоплотных экранов, так как в процессе длительной работы они

теряют теплозащитные свойства [7-6]. Стабильные качественные показатели изоляции сохраняются у перлитовых, асбестовермикулитовых, известково-кремнеземистых и других изоляционных материалов ограждающих конструкций. Для изоляции газоплотных экранов широко применяют известково-кремнеземистые плиты, а в последние годы начинают использовать напыляемую изоляцию. Крепление изоляции к газоплотным экранам может быть стержневым сквозным с выходом стержня на наружную поверхность и нес сквозным, когда стержень скрыт слоем изоляции. Защитное наружное покрытие может крепиться с помощью приваренных к экрану для крепления изоляции стержней или на поясных балках жесткости, что с точки зрения температурного режима работ ограждения предпочтительнее.

Рассматриваемые ниже типы изоляции и конструкции типовых узлов ограждений газоплотных котлов могут быть применены как для экранов с металлической обшивкой труб, так и для цельносварных экранов. В газоплотных цельносварных экранах конфигурация изолируемой поверхности получается сложной и нуждается в выравнивании. Назначением выравнивающего слоя является ликвидация длинных каналов вдоль плавниковых труб, которые получаются при установке плитной изоляции. Эти каналы могут служить проходами для топочных газов при неплотности экранов в работе котла под наддувом. Такое движение газов будет разрушать изоляцию и затруднит определение места неплотности в экране. У цельносварных экранов, предназначенных для работы с уравновешенной тягой, необходимость в выравнивающем слое отсутствует. Однако и здесь этот слой при его хорошей адгезии к трубам уменьшает подсос воздуха в местах незначительных неплотностей. Для выравнивающего слоя обычно применяют мастику, которая идет для уплотнения швов изоляционных плит. При монтаже ограждения из известково-кремнеземистой изоляции применяется мастика, которая по рецепту ЦКБ состоит из порошков известково-кремнеземистой изоляции, асбеста, крахмала и разводится водой. Клеящие свойства мастики незначительны, что вызывает затруднение при выравнивании изолируемой поверхности из плавниковых труб. Всесоюзным производственным объединением Союзэнергозашита разработана мастика [7-7], которая по результатам лабораторных испытаний имеет

лучшие адгезионные свойства при склейке изоляции с изоляцией и с металлом.

Типовой узел изоляции цельносварных газоплотных экранов, разработанный ТКЗ, показан на рис. 7-9, а; такой тип изоляции применен на котлах ТГМП-324, ТГМП-204 и др. Изоляция из известково-кремнеземистых плит толщиной около 160 мм крепится с помощью

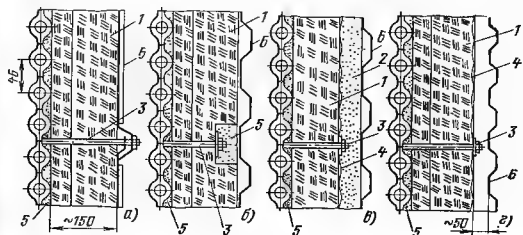


Рис. 7-9. Варианты выполнения натрубной изоляции цельносварных плавниковых экранов.

а — крепление изоляции стержнем с выходом на наружную металлическую обшивку; б — сквозное крепление стержнем с металлической обшивкой по изоляции; в — крепление комбинированной изоляции; г — установка металлической обшивки с воздушным зазором; 1 — изоляционные плиты; 2 — напыляемая изоляция; 3 — стержневое крепление; 4 — металлическая сетка; 5 — выравнивающий слой; 6 — наружная металлическая обшивка.

шпильки диаметром 12 мм, приваренных к плавникам экранных труб с шагом 500 мм. Выравнивающий слой по трубам и швы между плитами выполняются из мастики для кладки известково-кремнеземистой изоляции. Снаружи поверхность обмуровки закрывается специальными стальными листами обшивки толщиной $\delta = 1,2$ мм; листы в углах прижимаются специальными шайбами. Такое крепление обшивки удобно при ремонте изоляции и обеспечивает к ней легкий доступ. Однако этот вариант конструкции крепления металлической обшивки имеет недостаток. Выступающие наружу шпильки, соприкасаясь с наружной обшивкой, образуют теплопроводные включения с малым термическим сопротивлением, что приводит к появлению дополнительных тепловых потоков к поверхности изоляции и повышению ее температуры.

Кроме того, данная конструкция имеет высокий показатель массы, который можно уменьшить, упрощая узел прижима обшивочных листов, применяя шпильки диаметром 10 мм и заменяя обшивочный лист с $\delta=1,2$ мм на гофрированный толщиной $\delta=0,7-0,8$ мм. Исследования и результаты эксплуатации котла ТГМП-324 показали, что крепление наружной металлической обшивки металлическими стержнями, приваренными к крайним поверхностям нагрева, приводит к повышению температуры на поверхности охлаждения и соответственно к увеличению тепловых потерь в окружающую среду. Для уменьшения потерь в окружающую среду и температуры наружной поверхности ограждения целесообразно применять несковное стержневое крепление изоляции (рис. 7-9, б). В этом случае в известково-кремнеземной плите толщиной 105 мм делается местное углубление (около 50 мм), в котором размещается прижимная шайба. Наружный слой плит может быть связан с стержнями проволокой. Такой узел крепления по наружной поверхности выравнивается мастикой из известково-кремнеземной изоляции, а вплотную к изоляции устанавливается гофрированный металлический лист, закрепленный на балках жесткости. При креплении изоляции с помощью металлических стержней иногда вместо гаек применяют приварку (прихватку) предварительно поджатой шайбы к стержню. В этом случае несколько ускоряется сборка изоляции, укорачивается длина стержня, отпадает необходимость в гайках и нарезке резьбы для них. Однако такое крепление прижимной шайбы несколько усложняет снятие шайб при разборке ограждения.

На рис. 7-9, в показан способ крепления комбинированной изоляции, первый слой которой выполняется из известково-кремнеземистых плит толщиной 105 мм, уложенных на выровненную поверхность плавниковых труб. Плиты крепятся к стержням обвязкой проволокой. На плиты кладется сетка и наносится слой напыляемой изоляции толщиной 50 мм. Вплотную к изоляции устанавливается гофрированный металлический лист, который крепится на балках жесткости. Напыляемый слой изоляции закрывает отдельные неплотности в стыках известково-кремнеземистых плит. Напыляемая изоляция со связкой на жидком стекле обладает достаточной адгезией к известково-кремнеземистой изоляции.

На рис. 7-9, г показан вариант крепления изоляции из плит с помощью сквозных стержней. Поверх плит на стержни натягивается сетка, которая и закрепляет плиты. Наружная гофрированная металлическая обшивка отснесена от поверхности изоляции примерно на 50 мм и крепится на балки жесткости экрана. За счет такого расположения обшивки исключается передача ей теплоты от металлических стержней.

При креплении изоляционных плит стержнями последние приваривают к плавникам экранных труб с шагом, кратным шагу труб, что не всегда кратно размеру изоляционных плит. Это несоответствие требует подрезки известково-кремнеземистых плит и может приводить к потерям до 20% изоляционных материалов и дополнительным трудозатратам [7-8]. Этого можно избежать при применении комбинированного типа изоляции (рис. 7-10), когда плиты устанавливаются с зазором примерно 150—200 мм. Размер зазора выбирается из условия его надежного заполнения напыляемой изоляцией. Плиты желателен устанавливать в один слой толщиной 150 мм. Для крепления плит 3 используют стержни 2 диаметром 10—12 мм и длиной около 140 мм, приваренные под углом к плоскости экрана 1. В плитах 3 просверливают отверстия в соответствии с положением стержней. При приварке стержней и сверлении отверстий необходимо соблюдение угла наклона, что достигается применением специальных приспособлений. Диаметр отверстия в плите сверлится на несколько миллиметров больше диаметра стержня. Каждая плита (например, размером $1000 \times 500 \times 150$ мм) навешивается на один-два стержня. Зазоры после установки плит заполняют напыляемой изоляцией 4. Вплотную к изоляции устанавливается гофрированная обшивка 5, закреп-

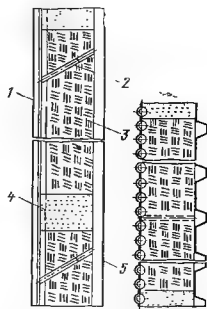


Рис. 7-10. Крепление изоляции из плит на наклонных стержнях с заполнением швов напыляемой изоляцией.

ленная на балках жесткости. Такой тип крепления изоляционных плит был опробован только при стендовых испытаниях и нуждается в проверке в промышленных условиях.

На рис. 7-11 показан вариант конструкции узла напыляемой изоляции. К плавникам экранов 1 приварива-

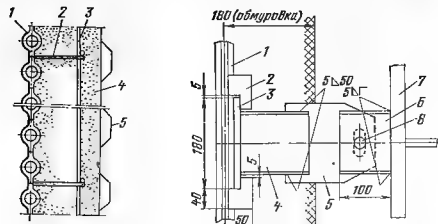


Рис. 7-11. Узел крепления напыляемой изоляции.

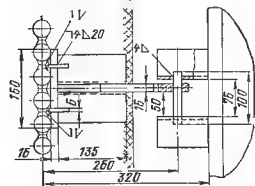


Рис. 7-12. Изоляция узла крепления балок жесткости.

ются стержни 2 из проволоки диаметром 6 мм, а к ним сварная сетка 3 из проволоки диаметром 4 мм с шагом ячейки 250 мм. Сетка устанавливается таким образом, чтобы после нанесения изоляции 4 она располагалась на глубине 40—50 мм от наружной поверхности. Снаружи вплотную к изоляции устанавливают гофрированную обшивку 5.

Отдельно следует остановиться на изоляции узлов крепления балок жесткости к экранам. Общими в этих узлах являются вынос их за пределы изоляции и шарнирное крепление с экраном деталей, расположенных с шагом около 500 мм по длине балок. На рис. 7-12 показан один из вариантов крепления балки жесткости 7 к экрану 1. К плавникам труб приваривают захваты 2,

удерживающие пластину 3, к которой приварены два швеллера 4. Между швеллерами вваривается пластина 5, имеющая овальное отверстие, в которое вставляется ось 8. Ось крепится в швеллерах 6, приваренных к балке жесткости. Такое соединение позволяет компенсировать взаимное перемещение экрана и балки жесткости в вертикальном и горизонтальном направлениях. Элементы крепления балок жесткости к экранам являются большими источниками выделения теплоты наружу «тепловыми мостами», поэтому вопросу их надежной изоляции следует уделять особое внимание при проектировании и монтаже. Надежная изоляция этого узла с учетом перемещений деталей крепления при температурном расширении экранов достигается с помощью напыляемой изоляции. Для этого в районе прохода креплений балок целесообразно оставлять зазор 250—300 мм, который после установки плит заполняется изоляцией.

7-4. НАРУЖНОЕ ПОКРЫТИЕ ОГРАЖДЕНИЯ ГАЗОПЛОТНЫХ ЭКРАНОВ

Назначение наружного покрытия ограждений газоплотных цельносварных и гладких экранов различно. Основным назначением покрытий в ограждениях газоплотных котлов является защита изоляции от механических повреждений. В котлах с гладкими экранами — обеспечение газоплотности. Для наружных покрытий ограждений котлов используются газоплотные штукатурки по металлической объемной сетке, а также различного рода синтетические покрытия, применяемые в котлах с гладкотрубными экранами с натрубной или накаркасной обмуровкой. В зарубежной практике для наружного слоя изоляции газоплотных экранов широко применяются тонкие профилированные гофрированные листы толщиной 0,5—1,0 мм, особенно из алюминия [7-9]. Часто эти листы окрашиваются в разные цвета с применением способов: химического или анодного оксидирования, эмалирования, покрытия термостойким лаком, нанесения пластмассовой пленки и др. Английские фирмы выпускают стальные листы с декоративным поливинилхлоридным покрытием. Появились защитные покрытия на основе пластмасс, например поливинилфторидных пленок (ПВФ), которые отличаются эластичностью, прочностью и химической стойкостью и могут быть окрашены

в различные цвета. Пленки устойчивы до температуры 200°C.

В отечественной практике применяются тонкие гофрированные листы из оцинкованной стали.

Гофрированные листы трапецевидной формы выпускаются Куйбышевским заводом «Электросит» (ТУ 34-5831-71). Листы изготавливаются длиной до 12 м, транспортируются в пакетах по 50—100 шт. и поставляются с крепежными деталями: самонарезающими бол-

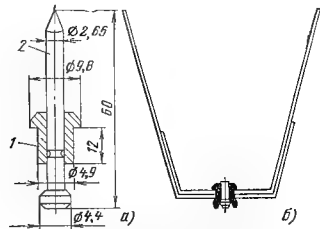


Рис. 7-13. Комбинированная заклепка.

а — общий вид заклепки; б — соединение листов комбинированной заклепкой.

тами (ТУ 34-5815-70) и комбинированными заклепками (ТУ 34-5814-70).

Самонарезающие болты применяются для крепления листов к несущим элементам, а комбинированные заклепки — для соединения листов между собой. Для применения болтов и заклепок в местах крепления должны быть предварительно просверлены отверстия. Стержень болта снабжен винтовыми бороздками подобно метчику, и при первом ввинчивании в отверстие самонарезающего винта специальным приспособлением он работает аналогично метчику.

Комбинированная заклепка (рис. 7-13, а) представляет собой втулку из алюминиевого сплава 1, внутри которой размещен стальной стержень 2 переменного сечения. Специальным инструментом, который захватывает стержень и одновременно опирается в отбортованную часть втулки, стержень протягивается в полость втулки.

При этом цилиндрическая часть втулки раздается, образуя замкнутую головку (рис. 7-13, б), а часть стержня над выточкой отрывается.

Гофрированные листы обладают различной жесткостью вдоль и поперек гофров. Прочностной расчет таких стенок достаточно сложен, поэтому в инженерной практике используют упрощенные методы расчета [7-10, 7-11].

Гофрированная наружная металлическая обшивка газоплотных котлов может устанавливаться на всю вы-

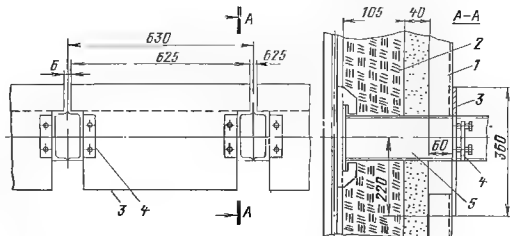


Рис. 7-14. Установка наружного гофрированного листа на элементы крепления балок жесткости.

соту пролета между балками жесткости, вплотную к изоляции или с некоторым зазором. Вариант крепления гофрированных листов 1 (рис. 7-14) с установкой их вплотную к комбинированной изоляции 2 может осуществляться с помощью прижимающих листов 3. При этом гофрированные листы устанавливаются на элементы крепления балки жесткости к экрану 5. На них же между гофрированным листом и приварными планками 4 вставляются прижимающие листы 3. Поджатие осуществляется с помощью болтов. Размеры прижимающей пластины должны быть выбраны так, чтобы обеспечить надежное крепление гофрированного листа при работе котла, когда за счет расширения экранов увеличивается расстояние между элементами крепления балок жесткости. При установке гофрированного листа 1 (рис. 7-15) с зазором от изоляции 2 листы обычно крепятся

к балкам жесткости. Для этого к балке жесткости 3 привариваются направляющие планки, причем планки для верхней части гофрированных листов 4 делаются увеличенной высоты по сравнению с планками для нижней части гофрированного листа 5. Гофрированный лист

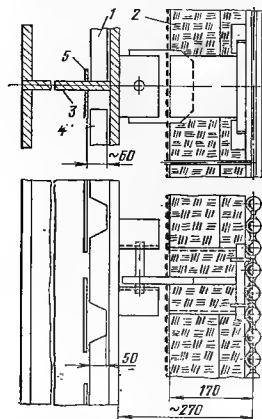


Рис. 7-15. Установка наружного гофрированного листа на балки жесткости.

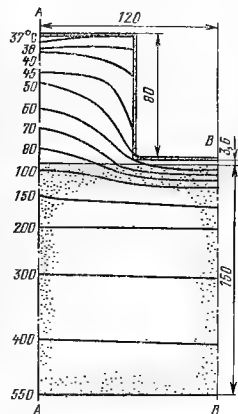


Рис. 7-16. Распределение температур в ограждении с наружным гофрированным листом.

вставляется под верхние планки, поднимается до упора в верхнюю балку жесткости и заводится за нижние планки до упора в нижнюю балку жесткости. Возможно применение только верхних направляющих планок 4; тогда гофрированный лист можно крепить к полке нижней балки жесткости самонарезающими винтами.

Воздушный зазор между защитным листом и изоляцией оказывает влияние на теплопередачу через ограждение. При малых воздушных зазорах (около 5—7 мм)

конвекция воздуха в воздушной прослойке практически отсутствует [7-12].

Вследствие малого зазора возникает дополнительное термическое сопротивление и снижение температуры ограждения.

Увеличение воздушного зазора не дает дополнительного эффекта снижения наружной температуры ограждения, так при этом пропорционально возрастает эквивалентный коэффициент теплопроводности, что приводит практически к неизменному значению термического сопротивления воздушной прослойки. Приведенные



Рис. 7-17. Распределение температур по развернутой поверхности гофрированного листа ограждения.

выше рассуждения относятся к воздушным прослойкам с плоскими стенками и не отражают фактической тепловой работы ограждения с гофрированным листом, у которого гофры служат своего рода ребрами охлаждения. Картина распределения температур в ограждении с воздушным зазором, образованным плоской стенкой изоляции и гофрированным листом, полученная методом конечных элементов, показана на рис. 7-16.

Таблица 7-2

Распределение температуры по длине гофра

Высота гофра ограждения h , мм	Температура гофра, °C			Развернутая длина гофра, мм	Теплопотери в окружающую среду q , ккал/(ч·м²)
	Минимальная	Максимальная	Средняя		
20	45	50	47,6	140	265
40	41,8	49	45,4	160	270
80	35,8	48	41,7	200	280

Распределение температур по длине развернутого гофра показано на рис. 7-17, результаты расчетов сведены в табл. 7-2.

7.5. НАПЫЛЯЕМАЯ ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Работы по совершенствованию конструкций тепловой изоляции привели к использованию на котлах напыляемой изоляции, которая широко применяется для изоляции турбин и экономична при монтаже и ремонте. Так, по отчетным данным изоляция формованными изделиями турбины К-300-240 на Черепетской ГРЭС превосходит стоимость изоляции методом напыления почти в 3 раза. Сравнение стоимости напыляемой и плитной изоляций для плоских изолируемых поверхностей применительно к котлу пока не сделано. Некоторые расчетные, экспериментальные работы и промышленные испытания, проведенные объединением Союзэнергозащита, показывают, что тепловую изоляцию методом напыления целесообразно выполнять не только на турбинах, но и на котлах, трубопроводах большого диаметра, пылегазовых трубопроводах, вентиляторах, дымососах и другом оборудовании энергетических блоков.

Изоляция методом напыления (набрызга) была разработана фирмой Робертс (Англия). Процесс выполнения тепловой изоляции методом напыления разделяется на подготовку материалов, их дозировку, смешивание и нанесение подготовленной смеси на изолируемую поверхность. В зарубежной практике для напыляемой изоляции применяется амфиболовый (голубой) асбест¹, содержащий значительное количество закиси железа и сравнительно мало химически связанной воды. Волокна его примерно в 2 раза прочнее и в несколько раз длиннее волокон хризотилового (белого) асбеста, а термостойкость выше на 15—20%. Асбест увеличивает прочность изоляции и обеспечивает ее эластичность.

Широкому распространению напыляемой изоляции способствуют ее хорошие тепло- и звукоизоляционные свойства, относительно высокая термостойкость, устойчивость к вибрациям, хорошая адгезия, монолитность, возможность нанесения практически на любой материал и на поверхности сложной формы.

К недостаткам напыляемой изоляции следует отнести неоднородность ее теплофизических характеристик, в значительной степени зависящих от рецептурных и

технологических отклонений при нанесении изоляции, опыта оператора, состояния машины, качества и влажности исходных материалов.

При нанесении изоляции на смонтированное оборудование с развитыми ограждающими поверхностями, например котел, не исключена возможность загрязнения близлежащих участков, не подлежащих изолированию, — балки, площадки, лестницы и т. д.

Большую работу по составам и технологии производства напыляемой тепловой изоляции и газоплотных наружных покрытий ведут ЦКТИ, УралВТИ, комбинат ЦЭТИ, объединение СЭЗ, Харьковский филиал ЦКБ и другие организации. Комбинатом ЦЭТИ разработана и внедрена в производство компактная установка для напыляемой тепловой изоляции, разработаны составы асбестоperlитовой изоляции на жидком стекле, проведена большая работа по изоляции энергетического оборудования методом напыления [7-13].

Для расширения области применения метода напыления во Всесоюзном объединении Союзэнергозащита разработан новый способ аэродинамической распышки асбеста, усовершенствован пистолет-напылитель, создан новый тип высокопроизводительной (1,2—1,8 м³/ч) напыляемой установки ТМ 1А [7-14].

Комбинатом ЦЭТИ совместно с ЦНИИСК проведена работа по усовершенствованию асбестоperlитовой напыляемой изоляции на жидком стекле [7-15]. Введение в существующий состав изоляции нефелнивого антипрена, выпускаемого Гомельским заводом (МРТУ 6-08-160-70), позволяет получить быстрое твердение состава напыляемой изоляции даже при нанесении ее на холодную поверхность. При этом отпадает ограничение толщины напыляемого слоя изоляции. Теплофизические характеристики напыляемой изоляции зависят от сорта применяемого асбеста. Так, применение асбеста V сорта взамен дефицитного асбеста III сорта сильно увеличивает плотность напыляемой теплоизоляции и зависящую от плотности теплопроводность. Образцы изоляции, изготовленные из асбеста, затворенного водой, имеют объемную массу [7-16].

¹ В последнее время ввиду вредности асбеста при распылении в зарубежной практике наблюдается переход на безасбестовые составы напыляемой изоляции.

Сорт асбеста	III	IV	V	VI	VII
Объемная масса, кг/м ³ .	350—400	450—550	600—700	700—1000	1000—1300

На рис. 7-18 показана зависимость теплопроводности асбеста при комнатной температуре от его плотности (объемной массы). Теплопроводность напыляемой изоляции, содержащей в своем составе большое количество асбеста, может ориентировочно оцениваться по данной зависимости. Так, проведенные испытания показали, что

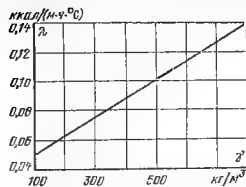


Рис. 7-18. Зависимость коэффициента теплопроводности образцов асбеста от плотности.

коэффициент теплопроводности напыляемой изоляции при комнатной температуре для объемной массы 200 кг/м³ (асбест III сорта) составил 0,061 ккал/(м·ч·°С), а для объемной массы 600 кг/м³ (асбест V сорта) 0,12 ккал/(м·ч·°С).

При контроле качества напыляемой изоляции на энергетическое оборудование обычно определяют объемную массу

изоляции. Приведенная на рис. 7-18 зависимость коэффициента теплопроводности от объемной массы изоляции позволяет судить о ее теплозащитных свойствах.

Глава восьмая

УТЕПЛЕННЫЕ ТОПКИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

8-1. НАЗНАЧЕНИЕ УТЕПЛЕННЫХ ТОПОК

Основным назначением утепленных экранированных топок является уменьшение тепловосприятия экранами от факела с целью повышения температуры в камере сгорания. Уменьшение тепловосприятия достигается закрытием части экранов огнеупорными массами или изделиями — созданием так называемых утепленных экранов¹. Этот тип экранов используют при сжигании влажных топлив в топках с жидким удалением шлака. В последнее время ошипованные утепленные экраны начинают находить применение для защиты от высокотемпературной коррозии экранных труб.

¹ Термин «утепленный экран» принят в практике котельной техники.

Утепление должно обладать повышенной устойчивостью против действия агрессивных топочных газов и шлаков, иметь достаточно высокую огнеупорность и механическую прочность. Кроме того, утепление должно обладать высокой теплопроводностью и адгезией к металлу трубы. Важным является также вопрос дефицитности и стоимости утепления.

Надежная работа топок с утепленными экранами зависит от адгезии утепления к металлу.

Специальная огнеупорная масса наносится на приваренные к трубам металлические шипы, предназначенные для надежного удержания и охлаждения огнеупорной массы. При проектировании утепленных ошипованных экранов необходимо выбирать набивную массу и оптимальную схему шипования, что производится на основании отраслевых стандартов. В ряде случаев может возникнуть необходимость теплового расчета ошипованного экрана с учетом конкретных особенностей его работы. Из опыта эксплуатации известно, что для надежной длительной работы утепленных экранов необходимо стремиться к снижению температуры наружной поверхности утепления (шипа и набивки). Снижение температуры достигается комплексом мероприятий конструктивного и технологического характера, основными из которых являются: а) увеличение плотности шипования (количества шипов на 1 м² обогреваемой поверхности экрана) и снижение их высоты; б) увеличение теплопроводности набивной массы.

При увеличении плотности шипования площадь соприкосновения набивной массы с охлаждающей поверхностью шипов растет, снижая температуру набивной массы. Уменьшение высоты шипов снижает температуру их вершины и способствует уменьшению температуры набивки. Кроме того, при этом уменьшается толщина набивки, и в ее охлаждении начинает заметно участвовать поверхность экранных труб.

Теплопроводность массы зависит от ее рецептурного состава и способа нанесения на ошипованный экран. Набивные массы состоят из огнеупорного наполнителя (90–95%), пластифицирующей добавки (5–10%) и связующего вещества (5–15%). До недавнего времени в качестве связующего вещества широко применялось жидкое стекло. В настоящее время широко применяются находят фосфатные и алюмофосфатные связующие, ко-

торые по своим свойствам превосходят жидкое стекло. Изменился и способ нанесения набивных масс на экраны. Сейчас широко применяется торкретирование ошпорованных экранов с помощью специальных торкрет-машин, что позволяет увеличить производительность труда и получить более качественное и теплопроводное утепление ошпорованных экранов. Этот способ заменил ручную набивку, при которой масса набрасывалась на экран вручную и уплотнялась деревянными молотками или пневмотрамбовками.

Надежная работа утепленных ошпорованных экранов зависит также от сушки и первого разогрева (обжига) набивных масс и от правильной их эксплуатации.

Работы по выбору оптимальных схем шпирования, материалов для утепляющих набивных масс и шпиров, исследования и расчеты тепловой работы ошпорованных экранов ведутся ВТИ, ЦКТИ, ВНИИогнеупоров, ОРГРЭС, ЗиО и др. [8-1—8-5].

8-2. ШИПЫ И ИХ РАЗМЕЩЕНИЕ НА УТЕПЛЕННЫХ ЭКРАНАХ

Наиболее распространенные шипы, как правило, имеют цилиндрическую форму и диаметром 10 и 12 мм. Вид головки и ножки шипа зависит от метода сварки. При приварке шпиров с помощью полуавтоматического сварочного пистолета лучше применять шипы с фасками на концах (рис. 8-1, а). Верхняя фаска улучшает контакт шипа с медной кангой сварочного пистолета, нижняя — обеспечивает зажигание сварочной дуги под слоем флюса в центре шипа и надежную его приварку всем сечением к трубе (рис. 8-1, а).

Для контактной сварки методом сопротивления на шиповальных автоматах АШ-1 и АШ-2 [8-6] применяются шипы с одинаковой фаской с обоих концов (рис. 8-1, б), так как в этом случае подача шпиров по шипопроводу осуществляется автоматически и ориентация шпиров не предусмотрена.

Шипы цилиндрической формы диаметром 10 и 12 мм, высотой 15 мм (ОСТ 24.410.23-73) изготавливаются на металлорежущих станках или методом штамповки из стального прутка пятого класса точности (ГОСТ 7417-75).

Из других форм шпиров следует отметить шипы с утолщенной ножкой (рис. 8-1, в), которые предназначе-

ны для ручной полуавтоматической их приварки к трубам. Утолщенная приварная часть шипа более интенсивно отводит теплоту к трубе, что способствует снижению температуры металла шипа.

Для отдельных наиболее ответственных участков топочных камер, расположенных в зонах повышенных тепловых потоков, могут применяться экраны, собранные из труб с укороченными шипами [8-3]. Уменьшение высоты шпиров производится после их приварки к трубе на фрезерных станках.

С целью равномерного охлаждения набивной массы шипы привариваются в шахматном порядке, при этом следует стремиться к равномерному шагу шпиров вдоль (s_1) и поперек трубы (s_2). В идеальном случае равномерное охлаждение набивки достигается при соотношении шагов $s_1 = 2s_2$. Однако практически такое соотношение получить трудно, так как s_2 зависит от наружного диаметра ошпорованных труб и их шага.

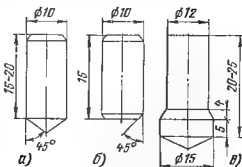


Рис. 8-1. Формы шпиров для утепленных экранов.

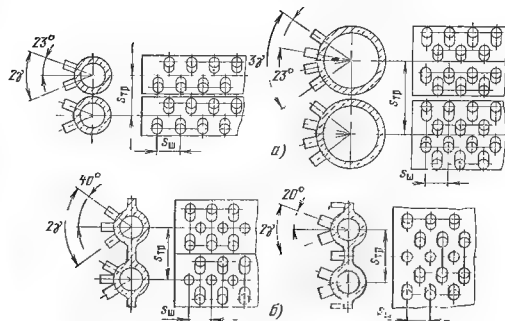


Рис. 8-2. Схемы размещения шпиров на экранных трубах.

Таблица 8-1

Характеристика	Варианты							
	Тип							
	Гладкая труба							
Наружный диаметр трубы $d_{тр}$, мм	32	32	50	57	60	50	57	60
Шаг трубы $s_{тр}$, мм	36	36	54	60	64	54	60	64
Диаметр шипа $d_{ш}$, мм	10	10	10	10	10	12	12	12
Число продольных рядов шипов	2	3	3	3	5	3	3	4
Угол между соседними продольными рядами шипов	23	23	33	34	17	22	34	23
Продольный шаг шипов s_1 , мм	16	20	16	16	20	25	20	25
Количество шипов на 1 м трубы	125	150	187	187	250	160	150	160
Количество шипов на 1 м ² экрана	3470	4160	3470	3120	3900	2960	2500	2500
Плотность шипования $f_{ш}$, %	27,3	32,8	27,3	24,5	30,6	33,4	28,2	28,2

Примечание. В скобках число рядов с учетом шипов, приваренных

При оценке плотности шипования показательным является количество шипов на 1 м трубы. В котлостроении под плотностью шипования $f_{ш}$ понимается выражение в долях единицы отношение суммарной площади сечения приваренных шипов на 1 м² плоскости ошпикованного экрана:

$$f_{ш} = 0,785 \frac{n_p d_{ш}^2}{s_1 s_{тр}}, \quad (8-1)$$

где n_p — число продольных рядов шипов на трубе; $d_{ш}$ — диаметр шипа. Схемы шипования гладких и плавающих труб предусмотрены ОСТ. На рис. 8-2 показаны варианты шипования гладких (а) и плавающих (б) труб. Размеры шипов и их расположение приведены в табл. 8-1.

шипования труб

Плавниковая труба													
32	32	38	50	50	57	60	60	50	50	60	60	60	60
46	46	60	70	70	75	60	80	70	70	60	80	80	80
10	10	10	10	10	10	10	10	12	12	12	12	12	12
3	2(3)	2(3)	5	3(4)	3(4)	6	4(5)	4	3(4)	4	3(4)	4	3(4)
40	20	22	25	30	33	22	22	30	28	30	32	32	32
18	20	16	20	16	16	20	20	25	25	25	25	25	25
166	150	187	250	250	250	300	250	160	160	160	160	160	160
3610	3260	3110	3570	3570	3330	3770	3130	2290	2290	2000	2000	2000	2000
28,4	25,6	24,5	28,0	28,0	26,1	29,6	24,5	26,0	26,0	22,5	22,5	22,5	22,5

к плавникам после стыковки труб.

Таблица 8-2

Марка стали шипов и плотность шипования экрана

Давление пара в котле, кгс/см²	Марка стали шипа	Плотность шипования экрана, %	Типы топок
40	Ст. 10	20	Полуоткрытые и открытые Высокофорсированные Полуоткрытые и открытые Высокофорсированные
100		25	
		25	
		30	
140	12Х1МФ	25	Полуоткрытые и открытые Высокофорсированные Все виды топок
255		30	
		30	

10*

В табл. 8-1 даны варианты шипования труб различных диаметров для получения максимальной плотности; более подробно сведения о схемах шипования приводятся в ОСТ 24.315.08-73.

Марка стали для изготовления шипов и плотность шипования экранов должны выбираться по ОСТ 24.030.32-73. В зависимости от давления пара и типа топки они приведены в табл. 8-2.

Для повышения срока службы утепленных экранов возможно применение для материалов шипов и высоколегированных марок сталей, например Х6СЮ, 1Х12СЮ, но их применение требует предварительной обработки технологии, обеспечивающей необходимое качество приварки шипов.

8.3. НАБИВНЫЕ МАССЫ ДЛЯ УТЕПЛЕННЫХ ЭКРАНОВ

Ранее было показано, что схема шипования выбирается таким образом, чтобы обеспечить надежное охлаждение набивной огнеупорной массы. Исходя из конкретных условий работы экрана выбирается набивная масса: она должна обладать достаточной огнеупорностью и термической стойкостью, повышенной устойчивостью к воздействию агрессивной среды топочных газов и шлака, иметь достаточно высокие прочностные свойства. Механизм разрушения набивки утепленных экранов довольно сложен. Существуют два основных процесса: химическое взаимодействие шлака с материалом массы и эрозия — абразивное воздействие на поверхность массы частицами топлива, кокса и каплями шлака [8-2]. В топках циклонного типа требования к прочности утепления возрастают из-за увеличенной скорости движения факела в пристенной области (60—120 м/с), что вызывает повышенный эрозийный износ. Химическое взаимодействие зависит от химико-минералогического состава шлака и набивной массы, физических свойств массы (смазываемости шлаком, пористости) и характера среды топочных газов. Для кислых шлаков с повышенным содержанием SiO_2 в настоящее время применяются хромитовые, карбундовые и значительно реже корундовые и шамотные массы. Для основных шлаков с повышенным содержанием CaO , которые, в частности, входят в состав углей Канско-Ачинского месторождения, имеется положительный опыт при-

менения хромомagneзитовых и карбундовых набивок [8-2].

Составы набивных масс, наиболее часто применяемых для утепления экранов котлов, приведены в приложении 5. Последние годы наибольшее распространение для утепленных экранов мощных котлов получила карбундовая набивка с применением взамен жидкого стекла новых связок. При применении карбундовой набивки следует помнить, что карбунд является пока дорогим материалом вследствие большой затраты энергии на его получение. Недостатком карбундовой набивки, ограничивающим в ряде случаев ее применение, является начиная с 1200°C интенсивное окисление карбида кремния [8-7].

При наличии шлаковой корки, защищающей наружную поверхность утепления, допустимая температура применения карбундовой набивки возрастает до 1500°C .

С целью защиты наружного слоя карбундовой набивки от окисления во ВТИ разработано предложение по применению двухслойной набивной массы. Покрытие со стороны газов карбундовой набивки тонким 5 мм слоем корундовой массы защищает карбунд не только от окисления, но и от эрозии, так как корундовая масса более устойчива против разведения шлаком.

8.4. РАБОТА ОШИПОВАННЫХ УТЕПЛЕННЫХ ЭКРАНОВ

Температурный режим сложного составного узла, состоящего из трубы, шипа, набивки, зависит от многих факторов: тепловой нагрузки экрана, теплофизических свойств шлака, теплопроводности материала шипов, трубы, набивки, вида шипов, схемы шипования и т. д. Аналитическое решение уравнений теплопроводности для такого составного узла представляет большие трудности [8-2, 8-3] и возможно лишь при наличии ряда допущений, которые получают на основании дополнительных аналитических исследований, стеновых и промышленных испытаний утепленных ошипованных экранов.

Расширение возможности аналитических исследований тепловой работы утепленных ошипованных экранов появилось с применением метода конечных элементов. Ниже рассмотрены температурные поля в ошипованных утепленных экранах с различными набивными массами и схе-

мами шипования. Учитывая сложность условий работы утепленного экрана со шлаковым покрытием и то, что в утепленных экранах встречаются отдельные участки, где из-за повышенных теплонапряжений и аэродинамики факела шлаковое покрытие отсутствует, расчет производился без учета шлакового покрытия. Это допущение расширяет возможность практического применения результатов расчета, если учесть, что утепленные ошипованные экраны начинают применять для защиты труб газомазутных котлов от высокотемпературной коррозии.

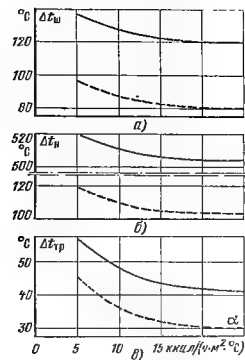


Рис. 8-3. Избыточные температуры $\Delta t_{ш}$ (а), $\Delta t_{н}$ (б), $\Delta t_{тр}$ (в) в зависимости от коэффициента теплоотдачи от металла трубы к рабочей среде.

— $\lambda_{н}=1,0$ ккал/(м·°С); — — — $\lambda_{н}=10$ ккал/(м·°С).

На графиках эти величины построены в зависимости от геометрических и теплофизических параметров ошипованного экрана при постоянном значении лучистого потока теплоты $q_0=10^8$ ккал/(ч·м²). При пересчете этих величин на другие значения теплового потока q можно воспользоваться формулой

$$\Delta t = \Delta t_0 \frac{q}{q_0} \quad (8-2)$$

Тогда температура в любой интересующей нас точке t равна:

$$t = t_{ср} + \Delta t_0 \cdot 10^{-5} q, \quad (8-3)$$

где $t_{ср}$ — температура рабочей среды в экраннйх трубах, °С; Δt_0 — избыточная температура в интересующей нас точке, взятая по графикам при $q_0=10^8$ ккал/(ч·м²); q — заданный тепловой поток, воспринятый экраном, ккал/(ч·м²).

На рис. 8-3 показано влияние коэффициента теплоотдачи α от стенки трубы к рабочей среде при двух значениях коэффициента теплопроводности набивки λ на избыточные температуры характерных точек утепленного экрана $\Delta t_{ш}$, $\Delta t_{н}$, $\Delta t_{тр}$. При изменении α от $5 \cdot 10^8$ до $25 \cdot 10^8$ ккал/(ч·м²·°С) снижение температуры происходит примерно на 15°С, причем наиболее интенсивное снижение наблюдается на участке изменения α от $5 \cdot 10^8$ до $15 \cdot 10^8$ ккал/(ч·м²·°С).

Влияние геометрических параметров шипования и теплопроводности набивочной массы на характерные температуры утепленного экрана (рис. 8-4) построены при значении $\alpha=15 \cdot 10^8$ ккал/(ч·м²·°С) для малотеплопроводных [$\lambda_{н}=1,0$ ккал/(м·ч·°С)] и высокотеплопроводных * [$\lambda_{н}=10$ ккал/(м·ч·°С)] набивочных масс. Зависимости построены для шипа диаметром 10 мм. Теплопроводность металла шипа и трубы принята $\lambda_{м}=30$ ккал/(м·ч·°С). В расчете принято допущение об идеальном контакте между набивкой и металлом.

Зона теплового влияния шипа R определяется в зависимости от количества шипов на 1 м² утепленного экрана (рис. 8-5) по формуле

$$\pi R^2 n = 1, \quad (8-4)$$

где n — количество шипов на 1 м².

На рис. 8-4, а показана зависимость характерных избыточных температур ошипованного экрана $\Delta t_{ш}$, $\Delta t_{н}$, $\Delta t_{тр}$ от высоты шипа H . Плотность шипования, показателем которой в данном случае является зона теплового влияния R , влияет на характерные температуры ошипованного экрана в случае применения набивок с малой теплопроводностью. Для набивок с высокой

* По зарубежным данным [8-8], коэффициент теплопроводности карборундовой набивки с высоким содержанием SiC и повышенной плотностью достигает значений $\lambda_{н}=7-14$ ккал/(м·ч·°С).

теплопроводностью влияющие плотности шипования незначительно. Существенное влияние на температуры ошипованного экрана оказывает теплопроводность набивной массы (рис. 8-4, б), особенно при значениях

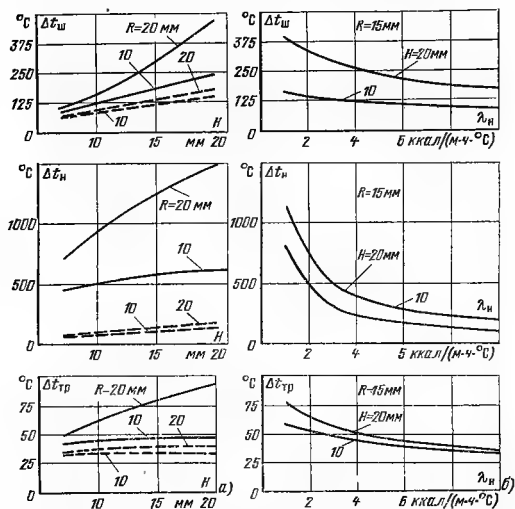


Рис. 8-4. Зависимость избыточных температур $\Delta t_{ш}$, $\Delta t_{н}$, $\Delta t_{тр}$ от основных геометрических (а) и теплофизических (б) параметров теплового экрана.

— $\lambda_n = 1$ ккал/(м·°С); --- $\lambda_n = 10$ ккал/(м·°С).

$\lambda_n < 6,0$ ккал/(м·°С). Из рис. 8-4 видно, что для обеспечения длительной работы экранов необходимо применять высокотеплопроводную набивную массу и небольшую высоту шипа, а также необходимо стремиться к ликвидации воздушного зазора на границе металл—набивка. Наличие воздушного зазора приводит к рез-

кому росту температуры набивной массы: при зазоре от 0 до 0,8 мм температура набивки (рис. 8-6, а) линейно возрастает от 1000 до 1940°С — для случая малотеплопроводной и от 163 до 1067°С — для высокотепло-

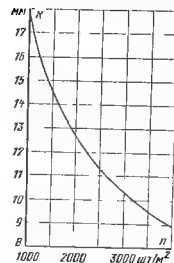
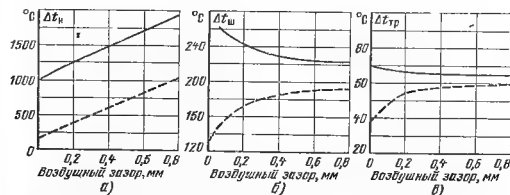


Рис. 8-5. Зона теплового влияния шипа R в зависимости от количества шипов n на 1 м².

Рис. 8-6. Влияние размера воздушного зазора на характер изменения избыточных температур $\Delta t_{ш}$, $\Delta t_{н}$, $\Delta t_{тр}$.

— $\lambda_n = 1$ ккал/(м·°С); --- $\lambda_n = 10$ ккал/(м·°С).



проводной набивки. Эти расчеты были произведены при $\lambda_{тр} = \lambda_{ш} = 30$ ккал/(м·°С), $H = 15$ мм, $R = 15$ мм, $\alpha = 15 \cdot 10^8$ ккал/(ч·м²·°С), двух значений теплопроводности набивки и теплопроводности воздуха в зазоре 0,05 ккал/(м·°С). Изменение избыточной температуры в вершине шипа в зависимости от размера воздушного зазора показано на рис. 8-6, а. Для малотеплопроводной набивки температура шипа за счет уменьшения притока теплоты уменьшается с 272 до 224°С; применение высокотеплопроводной набивки увеличивает температуру шипа до 194°С. Аналогичный характер изменения избыточной температуры наблюдается для наруж-

ной поверхности трубы под шипом (рис. 8-6, а), которая при высокотеплопроводной набивке возрастает от 37 до 60°C и при малотеплопроводной уменьшается от 69 до 65°C. Влияние неперевара шипа, определяемое в процентном отношении от площади его сечения, на характер распределения избыточной температуры сказывается незначительно. С изменением размера неперевара от 0 до 50% [при $\lambda_n = 1,0$ ккал/(ч·м·°C)] $\Delta t_{ш}$ увеличивается от 274 до 303°C, $\Delta t_{тр}$ от 69 до 85°C, Δt_n от 1000 до 1020°C.

Полученные в результате расчета методом конечных элементов температурные поля ошипованных утепленных экранов позволяют с достаточной точностью производить оценку характерных избыточных и действительных температур в экране.

Пример 8-1. Экран точки из труб 32×5 мм из стали 12Х1МФ с шагом 36 мм покрыт шипами из той же стали диаметром 10 мм, высотой $H=15$ мм; плотность шипования $\lambda_n=27,3\%$ (количество шипов на 1 м² $n=3470$ шт.). В качестве набивки использована корундовая масса на ортофосфорной кислоте. Экран работает при тепловом потоке $q=1,2 \cdot 10^5$ ккал/(ч·м²). Температура рабочей среды в экранных трубах $t_{ср}=400^\circ\text{C}$. Требуется определить максимальную температуру металла шипа, трубы и набивки. В случае получения недопустимо высоких температур следует предложить конструктивные мероприятия для их снижения.

Решение. Коэффициент теплопроводности набивной массы определяем по формуле

$$\lambda_n = 0,51 + 0,00078 t = 0,51 + 0,00078 \cdot 750 = 1,1 \text{ ккал/(м·ч·°C)},$$

где t — температура набивки, принятая равной 750°C как средняя между температурой среды (400°C) и температурой наружной поверхности (1100°C).

Зону теплового влияния шипа R находим по формуле (8-4)

$$R = 0,564 \sqrt{\frac{1}{n}} = 0,564 \sqrt{\frac{1}{3470}} = 9,6 \text{ мм.}$$

Тогда избыточные температуры Δt_n , $\Delta t_{ш}$, $\Delta t_{тр}$ по графикам рис. 8-7—8-9 при $q_0=10^5$ ккал/(м²·ч) составят, °C: $\Delta t_n=570$; $\Delta t_{ш}=185$; $\Delta t_{тр}=47$.

При заданном тепловосприятии $q=1,2 \cdot 10^5$ ккал/(ч·м²) и температуре среды 400°C искомые температуры утепленного экрана по формуле (8-3) составят:

$$t_n = 400 + 570 \cdot 1,2 = 400 + 685 = 1085^\circ\text{C};$$

$$t_{ш} = 400 + 185 \cdot 1,2 = 400 + 222 = 622^\circ\text{C};$$

$$t_{тр} = 400 + 47 \cdot 1,2 = 400 + 56 = 456^\circ\text{C}.$$

Отсюда видно, что температура шипа 622°C превышает допустимую по окислительнообразованию температуру для стали 12Х1МФ (600°C). Уменьшение температуры шипа может быть достигнуто

увеличением теплопроводности набивной массы или снижением высоты шипа. Проведем расчет утепления в случае применения карбонидной набивной массы, нанесенной на шипы плевотрамбовкой. Коэффициент теплопроводности массы составит:

$$\lambda_n = 3,02 + 0,0031 t = 3,02 + 0,0031 \cdot 550 = 5,0 \text{ ккал/(м·ч·°C)},$$

где $t = (400 + 700)/2 = 550^\circ\text{C}$.

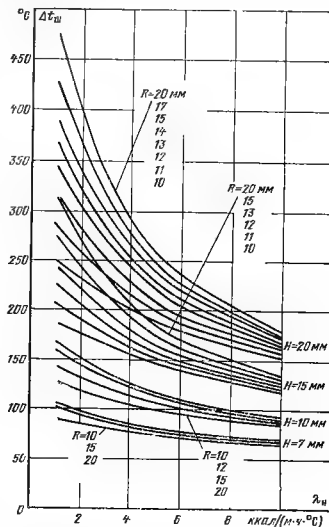


Рис. 8-7. Избыточная температура в вершине шипа $\Delta t_{ш}$ в зависимости от схемы шипования и теплопроводности набивной массы λ_n при $q_0=10^5$ ккал/(м²·ч) и $\alpha=12,5 \cdot 10^3$ ккал/(м²·°C).

Аналогично расчетам, проведенным ранее для корундовой массы, определяем избыточные температуры Δt_n , $\Delta t_{ш}$, $\Delta t_{тр}$ при $q_0=10^5$ ккал/(ч·м²), которые составляют, °C: $\Delta t_n=225$; $\Delta t_{ш}=145$; $\Delta t_{тр}=39$.

При расчетном тепловосприятии $q=1,2 \cdot 10^6$ ккал/(ч·м²) исходные температуры равны, °С: $t_{\text{н}}=670$; $t_{\text{ш}}=574$; $t_{\text{тр}}=447$.

Применение карбонудовой набивки снизило уровень температур в ошпикованном утепленном экране (в вершине шипа $t_{\text{ш}}=574^\circ\text{С}$). Однако металл шипов работает при температуре, близкой к предельной, а при возникновении дополнительных термических сопротивлений между шипом и набивкой эта температура может превысить предельную 600°С . Поэтому для надежности работы утепленного ошпикованного экрана, кроме повышения теплопроводности набивочной массы, желательно также уменьшить высоту шипа.

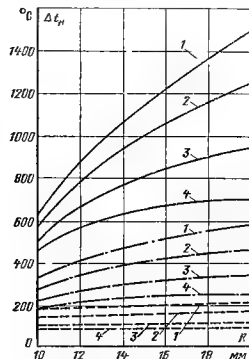


Рис. 8-8. Избыточная температура наружной поверхности набивки Δt_n в зависимости от схемы шипования и ее теплопроводности.

— $\lambda=1$; — — — $\lambda=3$;
— — — $\lambda=10$ ккал/(ч·°С); 1—4 —
H соответственно равно 20, 15, 10,
7 мм.

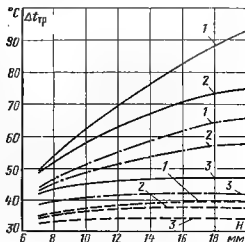


Рис. 8-9. Избыточная температура трубы под шипом $\Delta t_{\text{тр}}$ в зависимости от схемы шипования и теплопроводности набивочной массы.

— $\lambda_{\text{н}}=1$; — — — $\lambda_{\text{н}}=3$;
— — — $\lambda_{\text{н}}=10$ ккал/(ч·°С); 1—
3 — R соответственно равно 20, 15,
10 мм.

8-5. УТЕПЛЕННЫЕ ЭКРАНЫ ИЗ ТРУБ С ПОПЕРЕЧНЫМИ РЕБРАМИ

Значительного уменьшения температуры шипов и набивки можно было бы добиться применением шипов малой высоты, диаметра и густого шага их приварки (так называемой «щетки»). Однако изготовление такой конструкции связано с большими трудозатратами при шиповании труб. Более технологичной является

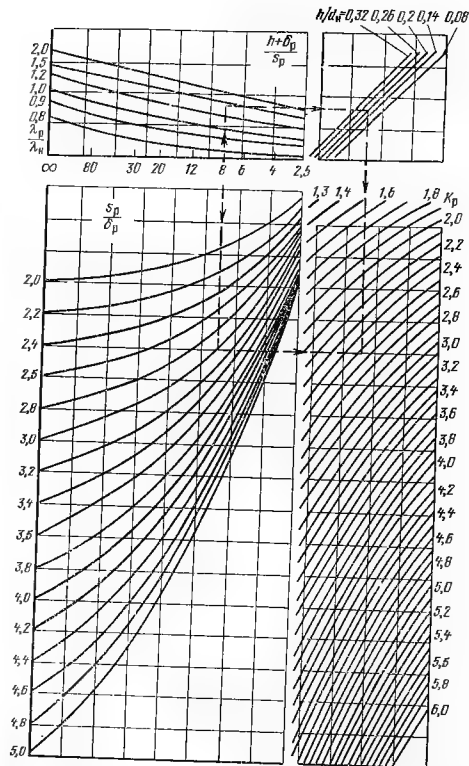


Рис. 8-10. Номограмма для определения концентрации K_p плотности теплового потока в ребре.

конструкция из труб с поперечным оребрением [8-9, 8-10]. Небольшая высота, толщина и шаг ребер позволяют снизить температуру вершины ребра и поверхность набивки до допустимого уровня.

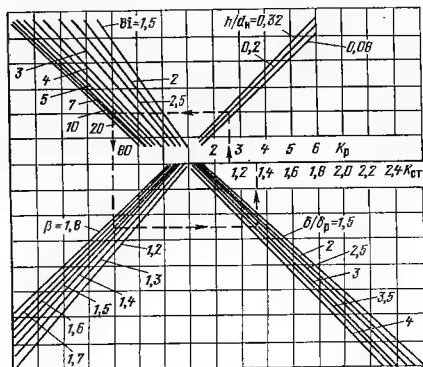


Рис. 8-11. Номограмма для определения концентрации $K_{ст}$ плотности теплового потока в стенке трубы.

Расчет утепленных экранов с поперечными ребрами [8-10] при заданной температуре рабочей среды ($t_{ср}$) и тепловой нагрузке экрана q ведется по формулам: для температуры вершины ребра t_p :

$$t_p = t_{ст} + k_p q \frac{h}{\lambda_p}; \quad (8-5)$$

для температуры стенки трубы под ребром $t_{ст}$:

$$t_{ст} = t_{ср} + k_{ст} q \beta \left(\frac{28}{\lambda_m (1 + \beta)} + \frac{1}{\alpha_2} \right); \quad (8-6)$$

для максимальной температуры набивки t_n между ребрами на уровне высоты ребра:

$$t_n = t_{ст} + q \left[R + \left(0,38 + 0,64 \frac{s_p - k_p \delta_p}{s_p - \delta_p} \right) \frac{h}{\lambda_n} \right], \quad (8-7)$$

где λ_m , λ_p , λ_n — коэффициенты теплопроводности металла трубы, ребра, набивки, ккал/(м·ч·°C); h , δ_p , s_p — высота, толщина и шаг ребер, м; δ — толщина стенки трубы, м; β — отношение наружного d_n диаметра трубы к внутреннему d_m ; α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к среде, ккал/(ч·м²·°C); $t_{ср}$ — температура среды, °C; R — термическое сопротивление на границе металл — набивка, ч·м²·°C/ккал; $k_{ст}$, k_p — концентрация плотности теплового потока в стенке трубы под ребром и в ребре трубы — определяются по номограмме рис. 8-10, 8-11.

Номограммы построены для утепленной трубы с кольцевыми поперечными ребрами. Толщина слоя набивки над ребрами принята 6 мм. Концентрация плотности теплового потока в ребре k_p является функцией безразмерных параметров

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_n}; \frac{s_p}{\delta_p}; \frac{h + \delta_p}{s_p}; \frac{h}{d_n}. \quad (8-8)$$

Концентрация плотности теплового потока в стенке трубы под ребром $k_{ст}$ является функцией безразмерных параметров

$$\frac{h}{d_n}; \beta; \frac{\delta}{\delta_p}; Bi = \frac{\alpha_2 d_n}{\lambda_m}. \quad (8-9)$$

Глава девятая

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОБМУРОВКИ

Для правильного выбора огнеупорных и изоляционных материалов, входящих в конструкцию обмуровки, необходим теплотехнический расчет, определяющий потери теплоты, внутреннюю и наружную температуры отражения.

Как уже упоминалось, вошедшие в практику современного котлостроения конструкции натрубных обмуровок имеют толщины порядка 100—160 мм и по существу являются газоплотной изоляцией топочных стен, полностью защищенных экранными поверхностями нагрева из плавниковых труб, гладкими трубами с тесным расположением или листовым покрытием. При таких небольших толщинах обмуровки определение температуры

на внутренней ее поверхности и правильный расчет являются необходимыми. Для удовлетворения требований, предъявляемых к ограждениям газопроводов, разработана методика теплового расчета обмуровки. Ниже приведены только основные предпосылки, конечные результаты и подробные примеры расчетов для использования их в практической работе. Выводы всех формул изложены в [9-1]. Тепловой расчет и определение температур металла плавников и труб таких экранов изложены в [9-2] и поэтому здесь не рассматриваются. Помещенный в данной главе материал позволяет производить расчеты существующих и разрабатываемых конструкций обмуровок.

9-1. КОЭФФИЦИЕНТ ОСВЕЩЕННОСТИ

Температура на внутренней поверхности обмуровки, защищенной экраном, зависит от расстояния (шага) между трубами, температуры и физических свойств

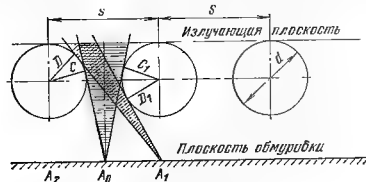


Рис. 9-1. Угасток обмуровки за трубами на протяжении одного шага.

потока газов. Температура на поверхности обмуровки экранированной стены распределяется неравномерно. Для определения этой температуры выделим и рассмотрим участок обмуровки, находящийся за двумя соседними трубами на расстоянии одного шага (рис. 9-1). На каждую точку, лежащую в плоскости обмуровки A_2A_1 , падают лучи с различной интенсивностью излучения. Интенсивность облучения каждой точки со стороны излучающей поверхности газового потока пропорциональна ее «освещенности» и характеризуется углом, в котором заключен поток лучей, падающих на эту точку. Таким углом для точки A_0 является угол CA_0C_1 , для

точки A_1 — угол DA_1D_1 . Поскольку освещенность различных точек неодинакова, различна и их температура. Очевидно, что наибольшую температуру будут иметь точки поверхности обмуровки, лежащие на линии A_0 (посредине экранных труб), а наименьшую — на линиях A_1 и A_2 (за трубами).

Отношение количества лучей, падающих в заданную точку, ко всему количеству лучей излучающего потока называется коэффициентом освещенности данной точки. Поскольку вопрос идет о тепловом излучении, температура каждой точки пропорциональна ее освещенности. Коэффициент освещенности часто называют коэффициентом облученности или угловым коэффициентом. Последний термин обычно применяется при расчетах теплообмена излучением между поверхностями тел. В этом случае угловой коэффициент характеризует отношение количества лучей, падающих на заданную поверхность, ко всему количеству лучей, посылаемых излучающим источником, т.е. угловой коэффициент для какой-либо поверхности является средним значением коэффициента освещенности для всех ее точек, «видящих» излучающий источник (поверхность). Определение среднего углового коэффициента для поверхности обмуровки шириной s необходимо для определения ее средней температуры.

Коэффициент освещенности точки A_0 (рис. 9-2)

$$\varphi_{A_0} = \frac{E_0}{E_{\max}} = \frac{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2}{2}, \quad (9-1)$$

где E_0 — полное количество лучистой энергии, падающей в точку A_0 из щели BB ; $E_{\max}$ — максимальное количество лучистой энергии (при отсутствии труб экрана), падающей в точку A_0 ; α_1 и α_2 — углы, показанные на рис. 9-2.

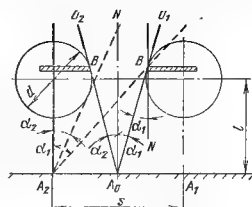


Рис. 9-2. Схема для определения коэффициента освещенности.

При симметричном расположении труб относительно точки A_0 наибольшее значение коэффициента освещенности

$$\varphi_{\text{Домакс}} = \frac{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2}{2} = \sin \alpha_1, \quad \alpha_1 = \alpha_2.$$

Наименьшее значение коэффициента освещенности будет в крайних точках A_1 и A_2 :

$$\varphi_{\text{Дмин}} = \frac{\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2}{2}, \quad \alpha_1 \neq \alpha_2.$$

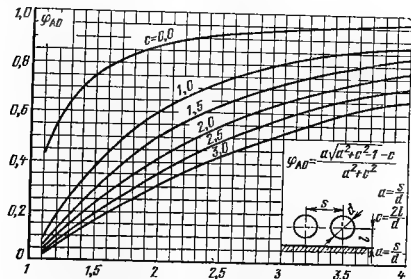


Рис. 9-3. Зависимость коэффициента освещенности φ_{A0} от относительного шага экранных труб $a = s/d$ при различных значениях $c = 2l/d$.

Таким образом, коэффициент освещенности для любой точки поверхности обмуровки равен полусумме синусов углов, составленных нормалью к ней и касательным, проведенным из этой точки к трубам.

После подстановки и несложных преобразований получим:

$$\varphi_{A0} = \frac{a \sqrt{a^2 + c^2 - 1} - c}{a^2 + c^2}, \quad (9-2)$$

где $a = s/d$; $c = 2l/d$.

Для удобства определения φ_{A0} составлен график значений φ_{A0} в зависимости от относительного шага экранных труб $a = s/d$ и отношения $c = 2l/d$ (рис. 9-3).

9-2. СРЕДНИЙ УГЛОВОЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Определение среднего углового коэффициента для плоскости можно произвести с помощью метода поточной алгебры [9-3]. В основе этого метода лежат следующие два положения:

1. Поверхности двух тел при лучистом теплообмене удовлетворяют свойству взаимности. Обозначим средний угловой коэффициент через $\bar{\varphi}$ (с черточкой сверху и двумя индексами внизу). Первый индекс обозначает излучающую поверхность, второй — поверхность, на которую падает часть лучей, исходящих от первой поверхности. Для двух поверхностей F_1 и F_2 , участвующих во взаимном теплообмене, угловые коэффициенты записываются так $\bar{\varphi}_{12}$ и $\bar{\varphi}_{21}$, а свойство взаимности как

$$\bar{\varphi}_{12} F_1 = \bar{\varphi}_{21} F_2.$$

Физическое свойство взаимности выражает условие, по которому количество лучей, падающих с первой поверхности на вторую, равно количеству лучей, падающих со второй поверхности на первую.

2. Тело со всеми окружающими телами и средами должно удовлетворять условию замыкаемости лучистого теплообмена. Если тело 1 излучает лучистый поток E_1 и часть этого потока E_{12} падает на тело 2, то средний угловой коэффициент выразится как

$$\bar{\varphi}_{12} = \frac{E_{12}}{E_1}.$$

Легко усмотреть, что сумма угловых коэффициентов лучистого теплообмена тела 1 с окружающими его телами всегда равна единице:

$$\sum_1^i \bar{\varphi}_{1i} = \bar{\varphi}_{12} + \bar{\varphi}_{13} + \dots + \bar{\varphi}_{1i} = 1.$$

Положим, что имеется замкнутая система, состоящая из трех тел, поверхности которых F_1 , F_2 и F_3 не имеют входящих углов (рис. 9-4). Соответствующие этим поверхностям средние угловые коэффициенты равны:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varphi}_{12} &= \frac{\bar{F}_{12}}{F_1} = \frac{F_1 + F_2 - F_3}{2F_1}; \\ \bar{\varphi}_{23} &= \frac{\bar{F}_{23}}{F_2} = \frac{F_2 + F_3 - F_1}{2F_2}; \\ \bar{\varphi}_{13} &= \frac{\bar{F}_{13}}{F_3} = \frac{F_1 + F_3 - F_2}{2F_3}. \end{aligned} \right\} \quad (9-3)$$

Пользоваться этими формулами следует так: пусть необходимо найти средний угловой коэффициент между

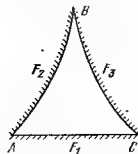


Рис. 9-4. Замкнутая система из трех тел.

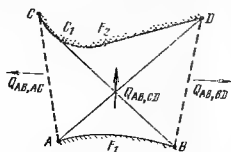


Рис. 9-5. Схема для определения углового коэффициента между двумя поверхностями произвольной формы.

двумя поверхностями F_1 и F_2 произвольной формы (рис. 9-5). Соединяем крайние точки обеих поверхностей наружными линиями H_1AC и H_2BD и проводим внутренние линии D_1BC_1C , D_2AD , которые будем называть диагоналями. Эти линии образуют два замкнутых контура: ADB и ABC_1C , каждый из которых состоит из трех поверхностей. Количество теплоты, которое передается с поверхности F_1 на F_2 , составит:

$$Q_{AB,CD} = Q_{AB} - Q_{AB,BD} - Q_{AB,AC}.$$

Среднее угловое отношение между F_1 и F_2 может быть найдено как

$$\bar{\varphi}_{AB,CD} = 1 - \bar{\varphi}_{AB,BD} - \bar{\varphi}_{AB,AC}.$$

Пользуясь формулами (9-3), определяем:

$$\bar{\varphi}_{AB,AC} = \frac{F_1 + F_2 - F_3}{2F_1} = \frac{AB + AC - BC_1C}{2AB};$$

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{AB,BD} &= \frac{AB + BD - AD}{2AB}; \\ \bar{\varphi}_{AB,CD} &= 1 - \frac{AB + AC - BC_1C + AB - AD + BD}{2AB} = \\ &= \frac{2AB - 2AB - AC + BC_1C + AD - BD}{2AB} = \\ &= \frac{BC_1C + AD}{2AB} - \frac{AC + BD}{2AB}, \end{aligned}$$

или при принятых обозначениях

$$\bar{\varphi}_{AB,CD} = \frac{D_1 + D_2}{2F_1} - \frac{H_1 + H_2}{2F_1}, \quad (9-4)$$

т. е. угловое отношение равно разности полусуммы диагоналей и полусуммы внешних линий, деленной на поперечный размер излучающей поверхности. Этот способ называется правилом натянутых нитей, и им удобно пользоваться при решении сложных задач при определении углового отношения.

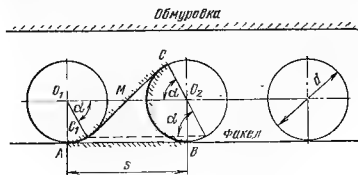


Рис. 9-6. К примеру 9-1.

Пример 9-1. Определить средний угловой коэффициент между газовым факелом и экранными трубами, закрывающими топочную стену, а также между факелом и поверхностью обмуровки (рис. 9-6).
Решение. Принимаем плоскость AB , касательную к трубам, за излучающую поверхность газа. Проводим общую касательную C_1C к двум соседним трубам и образуем замкнутый контур из трех поверхностей: AB , AC_1C и CB . Так как поверхность AB — 3 облучает две трубы с центрами O_1 и O_2 , то согласно формуле (9-3) имеем

$$\bar{\varphi}_{13} = 2\bar{\varphi}_{AB,BC} = 2 \frac{AB + BC - AC_1C}{2AB} = \frac{AB + BC - AC_1C}{AB},$$

$$\text{где } BC = \left(\frac{\pi}{2} + a\right) \frac{d}{2}; \quad AC_1C = \left(\frac{\pi}{2} - a\right) \frac{d}{2} + d \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\bar{\varphi}_{12} = \frac{s + \left(\frac{\pi}{2} + a\right) \frac{d}{2} - \left(\frac{\pi}{2} - a\right) \frac{d}{2} - d \lg \alpha}{s}.$$

Из треугольника CMO_2

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{CM}{O_2C} = \frac{\sqrt{(O_2M)^2 - (O_2C)^2}}{O_2C} = \sqrt{\left(\frac{O_2M}{O_2C}\right)^2 - 1} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1}, \end{aligned}$$

откуда

$$\alpha = \arctg \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1}.$$

Подставим значение α в выражение для $\bar{\varphi}_{12}$ и, сделав преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{12} &= \left(s - d \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} + d \arctg \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1}\right) \frac{1}{s} = \\ &= 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{s}\right)^2} + \frac{d}{s} \arctg \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1}. \end{aligned}$$

Обозначив относительный шаг экрана $a = s/d$, получим:

$$\bar{\varphi}_{12} = 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}} + \frac{1}{a} \arctg \sqrt{a^2 - 1}. \quad (9-5)$$

но поскольку $\bar{\varphi}_{12} + \bar{\varphi}_{13} = 1$, то

$$\bar{\varphi}_{13} = 1 - \bar{\varphi}_{12} = \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}} - \frac{1}{a} \arctg \sqrt{a^2 - 1}. \quad (9-5a)$$

Пример 9-2. Найти угловой коэффициент между газовым факелом и экранными трубами, полутопленными в обмуровку (рис. 9-7).
Решение.

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{12} &= 2 \frac{AB + AC - BB_1C}{2AB} = \frac{s + \frac{\pi d}{4} - CB_1B}{s}; \\ CB_1 &= \sqrt{\left(s - \frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \sqrt{s(s-d)}; \\ BB_1 &= \frac{\pi d}{360} \alpha = \frac{\pi d}{360} \arcsin \frac{d}{2s-d}, \end{aligned}$$

где $\sin \alpha = \frac{d}{2} / \left(s - \frac{d}{2}\right) = \frac{d}{2s-d}.$

откуда

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_{12} &= \frac{s + \frac{\pi d}{4} - \frac{\pi d}{360} \arcsin \frac{d}{2s-d} - \sqrt{s(s-d)}}{s} = \\ &= 1 + \frac{\pi}{4a} - \frac{\pi}{360a} \left(\arcsin \frac{1}{2a-1}\right) - \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}}, \end{aligned} \quad (9-6)$$

где $a = s/d$.

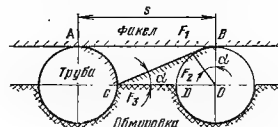


Рис. 9-7. К примеру 9-2.

Далее находим $\bar{\varphi}_{13}$ на основании того, что $\bar{\varphi}_{13} = 1 - \bar{\varphi}_{12}$.

Для удобства определения значений $\bar{\varphi}_{12}$ составлены графики зависимости $\bar{\varphi}_{12}$ от относительного шага экранных труб $a = s/d$ (рис. 9-8).

Для определения углового отношения в более сложных случаях воспользуемся способом «натянутых нитей». По этому способу экранные трубы и излучающие поверхности вычерчиваются в разрезе в натуральную величину, натягиваются внешние и внутренние «нити» и измеряются длины внешних и внутренних диагоналей. Измерение длины «нитей» удобнее всего производить при помощи курвиметра (прибор для измерения длины кривых).

Перед тем, как перейти к сложным системам,

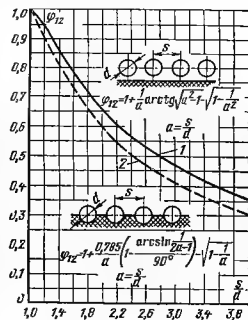


Рис. 9-8. Зависимость величин среднего углового отношения $\bar{\varphi}_{12}$ от относительного шага экранных труб $a = s/d$.

рассмотрим определение углового отношения для простейших случаев. Средний угловой коэффициент для сложного экрана, состоящего из кипящих и перегревательных труб (рис. 9-9), находится следующим образом. Обозначив индексами «к» и «п» экранные и пароперегревательные трубы, определим раздельно средние угловые коэффициенты.

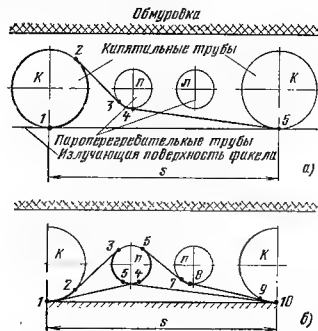


Рис. 9-9. Сложный экран, состоящий из кипящих и пароперегревательных труб.

Для каждой кипящей трубы (рис. 9-9, а) будем иметь согласно (9-4):

$$\bar{\varphi}_{ск} = \frac{(D_1 + D_2) - (H_1 + H_2)}{2s} = \frac{[(1-5) + (1-2)] - [(2-3-4-5)]}{2s},$$

где длина внешней нити равна нулю ($H_1=0$), так как труба касательна к излучающей плоскости; диагональ D_1 совмещается с плоскостью излучения:

$$D_1 = 1-5 = s; \quad H_2 = 2-3-4-5.$$

Для каждой пароперегревательной трубы (рис. 9-9, б)

$$\bar{\varphi}_{сп} = \frac{[(1-4-6) + (10-5-3)] - [(1-2-3) + (10-9-8-7-6)]}{2s}.$$

Суммарный средний угловой коэффициент для всего экрана

$$\bar{\varphi}_9 = 2(\bar{\varphi}_{ск} + \bar{\varphi}_{сп}). \quad (9-7)$$

Таким образом, средний угловой коэффициент сложного экрана равен сумме угловых коэффициентов кипящих и перегревательных труб, расположенных на длине s .

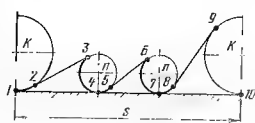


Рис. 9-10. Сложный экран, состоящий из кипящих и пароперегревательных труб, расположенных касательно к одной плоскости.

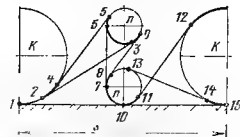


Рис. 9-11. Сложный экран с перегревательными трубами, расположенными между кипящими «в затылок».

Далее приводится ход определения угловых коэффициентов для встречающихся в практике схем сложных экранов:

1. Кипящие и перегревательные трубы расположены касательно к одной плоскости (рис. 9-10):

$$\bar{\varphi}_{ск} = \frac{[(7-10) + (9-10)] - (7-8-9)}{2s};$$

$$\bar{\varphi}_{сп} = \frac{[(1-4) + (3-4) - (1-2-3)] + [(4-7) + (6-7)] - (4-5-6)}{2s};$$

$$\bar{\varphi}_{90} = 2(\bar{\varphi}_{ск} + \bar{\varphi}_{сп});$$

$$\bar{\varphi}_{ск} = \frac{[(10-15) + (15-14-12)] - (10-11-12)}{2s}.$$

2. Перегревательные трубы расположены между кипящими «в затылок» по отношению одна к другой (рис. 9-11):

$$\bar{\varphi}_{сп} = \frac{[(1-2-3-9) + (10-7-6-5)] - [(1-2-4-5) + (10-7-8-9)]}{2s} +$$

$$+ \frac{[(10-15) + (10-11-13)] - I(13-14-15)}{2s};$$

$$\bar{\varphi}_{s3} = 2(\bar{\varphi}_{sk}^I + \bar{\varphi}_{sn}^I).$$

9-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕНЫ ОБМУРОВКИ ЗА ЭКРАНАМИ

В основе методики расчета температуры на поверхности обмуровки за экранными трубами лежат следующие допущения:

1. Источник излучения на обмуровку (факел топки или поток газов) на протяжении рассматриваемого участка имеет постоянную температуру.

2. За излучающую поверхность принимается бесконечно большая плоскость, проведенная касательно к экранным трубам, так как длина экранных труб во много раз больше их шага.

3. При расчете лучистого теплообмена учитываются только однократное отражение и поглощение лучей поверхностями, участвующими в теплообмене. Последнее допущение значительно упрощает формулы и не вносит в них существенной погрешности.

Рассмотрим общий случай сложного экранирования стены кипятельными и перегревательными трубами, используя для этого рис. 9-9, а. Примем для поверхностей, участвующих в теплообмене, следующие индексы: для факела 1, для труб 2 и для обмуровки 3.

Введем обозначения: φ_{12k} , φ_{12n} — средние угловые коэффициенты между факелом, кипятельными и перегревательными трубами; φ_{32k} , φ_{32n} — средние угловые коэффициенты между обмуровкой, кипятельными и перегревательными трубами; F_1 , F_{2k} , F_{2n} , F_3 — поверхности факела, кипятельных и перегревательных труб и обмуровки, участвующие во взаимном теплообмене; T_1 , T_{2k} , T_{2n} , T_3 — средние температуры факела, кипятельных и перегревательных труб и обмуровки, К; ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 — коэффициенты поглощения (степени черноты) факела, труб и обмуровки; c_1 , c_2 , c_3 , c_0 — постоянные излучения факела, труб, обмуровки и абсолютно черного тела; q_k , q_5 — количество теплоты, переданное обмуровке при помощи конвективного теплообмена, и потери теплоты обмуровки во внешнюю среду.

Тогда средняя температура поверхности обмуровки, защищенная сложным экраном, найдется из выражения

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{(1 - \bar{\varphi}_{12}) \epsilon_1 T_1^4 + (\bar{\varphi}_{32k} T_{2k}^4 + \bar{\varphi}_{32n} T_{2n}^4) \epsilon_2}{(1 - \bar{\varphi}_{33}) \epsilon_1 + \bar{\varphi}_{33} \epsilon_3}}. \quad (9-8)$$

Для простого экрана при экранировании трубами одного диаметра, лежащими в одной плоскости, с одной

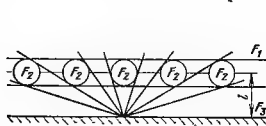


Рис. 9-12. Простой экран с трубами одного диаметра, лежащими в одной плоскости.

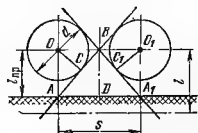


Рис. 9-13. К определению температуры поверхности обмуровки газохода.

и той же температурой среды $T_{2k} = T_2$ при $\bar{\varphi}_{32} = \bar{\varphi}_{12}$ и $T_{2n} = 0$ получим:

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{(1 - \bar{\varphi}_{12}) \epsilon_1 T_1^4 + \bar{\varphi}_{12} \epsilon_2 T_2^4}{(1 - \bar{\varphi}_{12}) \epsilon_1 + \bar{\varphi}_{12} \epsilon_2}}. \quad (9-9)$$

Равенство $\bar{\varphi}_{32} = \bar{\varphi}_{12}$ вытекает из следующего: если излучающая плоскость и длина труб достаточно велики, то все лучи, излучаемые плоскостью F_3 (рис. 9-12), обязательно проходят через плоскость, касательную к трубам, независимо от расстояния l . Поэтому эту касательную плоскость можно считать первично излучающей и принимать, как для факела, $F_3 = F_1$; следовательно, $\bar{\varphi}_{32} = \bar{\varphi}_{12}$.

Таким образом, при расчете средней температуры внутренней поверхности обмуровки для простого экрана расстояние l на взаимный теплообмен между плоскостью обмуровки и поверхностью неутопленных труб влияния не оказывает, если трубы касательны к плоскости излучения. По средней температуре обмуровки производится расчет потерь теплоты через ограждение.

Для выбора материала обмуровки газохода необходимо знать максимальную температуру поверхности обмуровки. Ее следует определять только тогда, когда обмуровка на протяжении одного шага труб с освещается лишь из одной щели (рис. 9-13). В том случае, когда на обмуровку шириной s падают лучи из соседних щелей, температура на ее поверхности выравнивается и приближается к средней. Интенсивность освещения обмуровки из одной щели на ширине s зависит от расстояния l от труб и относительного шага $s/d = a$. Предельное расстояние $l_{\text{пр}}$, при котором на ширину s падают лучи только из одной щели (рис. 9-13), определяется из подобия треугольников:

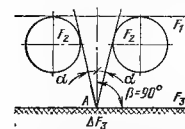


Рис. 9-14. К определению максимальной температуры на поверхности обмуровки.

только из одной щели (рис. 9-13), определяется из подобия треугольников:

$$l_{\text{пр}} = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{a^2}{a^2 - 1}}. \quad (9-10)$$

Определение максимальной температуры на поверхности обмуровки производится только для $l \leq l_{\text{пр}}$. Когда $l > l_{\text{пр}}$, выбор материалов производится по средней температуре, определяемой по формуле (9-9).

Пример 9-3. Определить $l_{\text{пр}}$ для экрана, имеющего относительный шаг $a = s/d = 64/60 \approx 1,07$ и максимальную температуру на поверхности обмуровки.

Решение.

$$l_{\text{пр}} = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{a^2}{a^2 - 1}} = \frac{60}{2} \sqrt{\frac{1,07^2}{1,07^2 - 1}} \approx 86 \text{ мм.}$$

Экранные трубы обычно отстоят от поверхности обмуровки на расстоянии $l = d/2 + (20 \div 30)$ мм. Для рассматриваемого примера $l = 60/2 + 30 = 60$ мм и $l < l_{\text{пр}}$, поэтому необходимо определять максимальную температуру поверхности. Максимальную температуру на поверхности обмуровки можно найти, полагая, что теплопроводность вдоль плоскости обмуровки равна нулю. Рассмотрим элемент обмуровки Δf_3 , помещенный в точке A между двумя соседними трубами (рис. 9-14); этот элемент получает от факела теплоту, которая пропорциональна коэффициенту освещенности точки A [см. формулу (9-1)]:

$$\varphi_{A1} = \frac{\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2}{2} = \sin \alpha.$$

Кроме того, на этот элемент падает часть теплоты, излучаемой экранными трубами, пропорциональная угловому отношению между точкой A и пучком труб.

Количество лучей, падающих в точку A со стороны пучка труб, ограничивается двойным углом (рис. 9-14) и может быть найдено как

$$E_{A2} = 2 \int_{\alpha}^{\beta} E_N \cos \alpha d\alpha = 2E_N (\sin \beta - \sin \alpha).$$

Соответственно угловое отношение

$$\varphi_{A2} = \frac{E_{A2}}{2E_N} = \sin \beta - \sin \alpha,$$

но так как $\beta = 90^\circ$, то

$$\varphi_{A2} = 1 - \sin \alpha. \quad (9-11)$$

Из уравнения теплового баланса для элемента обмуровки, расположенного на средней линии между соседними трубами, находим:

$$T_{\text{з макс}} = \sqrt[4]{\frac{(\varphi_{A1} \epsilon_1 T_1^4 + \varphi_{A2} \epsilon_2 T_2^4) \epsilon_3}{\varphi_{A1} \epsilon_3 \epsilon_1 + \varphi_{A2} \epsilon_3 \epsilon_2}} = \sqrt[4]{\frac{\varphi_{A1} \epsilon_1 T_1^4 + \varphi_{A2} \epsilon_2 T_2^4}{\varphi_{A1} \epsilon_1 + \varphi_{A2} \epsilon_2}}, \quad (9-12)$$

где $\varphi_{A2} = 1 - \varphi_{A1} = 1 - \sin \alpha$ [угол α есть половина угла, образованного касательными, проведенными из точки A к трубам (см. рис. 9-14)].

Пример 9-4. Определить среднюю и максимальную температуру на внутренней поверхности экранированной обмуровки топочной камеры котла при следующих условиях: $T_1 = T_{\text{ф}} = 1400 + 273 = 1673$ К; $T_2 = 327 + 273 = 600$ К; шаг труб $s = 95$ мм; диаметр труб $d = 76$ мм; расстояние от обмуровки до центра трубы $l = 60$ мм; степень черноты факела (пыль АШ) $\epsilon_1 = 0,45$; степень черноты труб (окисленная сталь при температурах до 600°C) $\epsilon_2 = 0,8$.

Определяем вспомогательные величины:

$$a = \frac{s}{d} = \frac{95}{76} \approx 1,25; \quad c = \frac{2l}{d} = \frac{2 \cdot 60}{76} \approx 1,58.$$

По формуле (9-10) находим $l_{\text{пр}}$:

$$l_{\text{пр}} = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{a^2}{a^2 - 1}} = \frac{76}{2} \sqrt{\frac{1,25^2}{1,25^2 - 1}} \approx 63 > 60.$$

Коэффициент освещенности точки A по формуле (9-2) равен:

$$\varphi_{A1} = \frac{a \sqrt{a^2 + c^2 - 1} - c}{a^2 + c^2}$$

$$= \frac{1,25 \sqrt{1,25^2 + 1,58^2} - 1 - 1,58}{1,25^2 + 1,58^2} \approx 0,148.$$

Из формулы (9-1) $\varphi_{A1} = \sin \alpha$, откуда

$$\alpha = \arcsin \alpha = \arcsin 0,148 \approx 8^\circ 30'.$$

Угловое отношение между точкой А и трубами найдем по формуле (9-11):

$$\varphi_{A2} = 1 - \sin \alpha = 1,00 - 0,148 \approx 0,852.$$

Тогда максимальная температура на поверхности обмуровки по формуле (9-12) составит:

$$T_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{\varphi_{A1} \varepsilon_1 T_1^4 + \varphi_{A2} \varepsilon_2 T_2^4}{\varphi_{A1} \varepsilon_1 + \varphi_{A2} \varepsilon_2}} = \\ = \sqrt[4]{\frac{0,148 \cdot 0,45 \cdot 1673^4 + 0,852 \cdot 0,8 \cdot 600^4}{0,148 \cdot 0,45 + 0,852 \cdot 0,8}} = 943 \text{ K} = 670^\circ \text{C},$$

а среднее угловое отношение

$$\bar{\varphi}_{12} = 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}} + \frac{1}{a} \arctg \sqrt{a^2 - 1} = \\ = 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{1,25^2}} + \frac{1}{1,25} \arctg \sqrt{1,25^2 - 1} \approx 0,915.$$

Отсюда найдем среднюю температуру на поверхности обмуровки

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{(1 - \bar{\varphi}_{12}) \varepsilon_1 T_1^4 + \bar{\varphi}_{12} \varepsilon_2 T_2^4}{(1 - \bar{\varphi}_{12}) \varepsilon_1 + \bar{\varphi}_{12} \varepsilon_2}} = \\ = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0,915) \cdot 0,45 \cdot 1673^4 + 0,915 \cdot 0,8 \cdot 600^4}{(1 - 0,915) \cdot 0,45 + 0,915 \cdot 0,8}} = 843 \text{ K} = 570^\circ \text{C}.$$

В данном случае средняя температура получилась ниже максимальной на 100°C .

9.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕНЫ ОБМУРОВКИ НЕЭКРАНИРОВАННОГО ГАЗОХОДА

При расчете обмуровки неэкранированных газоходов без холодных поверхностей температуру на внутренней поверхности принимают равной температуре поступающих горячих газов. В этом можно убедиться, составив уравнение теплового баланса для единицы по-

верхности стенки. Сохраняя прежние обозначения и опуская равные количества теплоты, полученные и отданные противоположными стенками газохода, получаем:

$$c_1 \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \varepsilon_3 + q_k = c_3 \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \varepsilon_1 + q_b. \quad (9-13)$$

В левой части выражения (9-13) — количество теплоты, переданное стенке обмуровки газовым потоком, в правой — количество теплоты, переданное обмуровкой потоку газа, и потерн теплоты во внешнюю среду. Так как $c_1 \varepsilon_3 = c_3 \varepsilon_1$, а значения q_b и q_k соизмеримы, то температура на поверхности обмуровки практически не отличается от температуры газа ($T_3 \approx T_1$).

Наличие в неэкранированном газоходе холодных поверхностей в виде змеевиков пароперегревателя или водяного экономайзера понижает температуру внутренней поверхности обмуровки. Последнюю можно найти, если к правой части выражения (9-13) добавить количество теплоты, переданное обмуровкой холодной поверхности, $q_{х.п}$ с учетом коэффициента поглощения ε_l . В этом случае температура внутренней поверхности обмуровки составит:

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{T_1^4 \varepsilon_1 + T_2^4 (1 - \varepsilon_1) \bar{\varphi}_{32} + (q_k - q_b) \cdot 10^8 \frac{1}{c_3}}{\varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1) \bar{\varphi}_{32} \varepsilon_2}}. \quad (9-14)$$

Угловой коэффициент между плоскостью стены обмуровки и трубами змеевиков с одинаковым шагом может быть определен по формуле [9-1]

$$\bar{\varphi}_{32} = 1 - (1 - \bar{\varphi}_{3p})^n,$$

где φ_{3p} — угловой коэффициент между обмуровкой и первым рядом труб; n — число рядов змеевиков.

При $\varphi_{3p} < 1$ и достаточно большом n значение $(1 - \varphi_{3p})^n$ приближается к нулю, а $\varphi_{32} \approx 1$.

Пример 9-5. Определить температуру на поверхности обмуровки в районе конвективного пароперегревателя при $t_1 = 1000^\circ \text{C}$. Топливо — АИЛ, способ сжигания — факельный; $\varepsilon_1 = 0,45$; $\varepsilon_2 = 0,85$; $\varphi_{32} = \varphi_{32} = 1$; $q_5 = 300 \text{ ккал/(ч} \cdot \text{м}^2)$; $t_2 = 477^\circ \text{C}$ (750 K); $c_3 = 4,2 \text{ ккал/(ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Решение. Оценивая предварительно температуру обмуровки ($t_3=900^\circ\text{C}$) и коэффициент теплоотдачи от газов к стенке [$\alpha_{\text{гк}}=20 \text{ ккал}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$], находим $q_{\text{гк}}$ и t_2 :

$$q_{\text{гк}} = \alpha_{\text{гк}} (t_1 - t_3) = 20 (1000 - 900) = 2000 \text{ ккал}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2);$$

$$T_8 = \sqrt[4]{\frac{1273^4 \cdot 0,45 + 750^4 \cdot 0,85 (1 - 0,45) \cdot 1 + \frac{1}{4,2} \cdot 10^8 (2000 - 300)}{0,45 + (1 - 0,45) \cdot 1 \cdot 0,85}} = 1118 \text{ K } (845^\circ\text{C}).$$

Таким образом, температура обмуровки при наличии холодного пакета труб в газоходе получилась на 155°C ниже температуры газового потока.

9-5. ВЕЛИЧИНЫ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ОГРАЖДЕНИЯ

Основной величиной, определяющей расчет ограждений, является температура на внутренней поверхности обмуровки. Материал футеровки выбирается по максимальной температуре, а расчет потерь теплоты и распределения температур по слоям производится по средним температурам. Неравномерностью распределения температур на внутренней поверхности обмуровки пренебрегают, так как имеют место растечка теплоты и выравнивание температур по толщине ограждения. Потери теплоты зависят от теплового потока, значения которого определяются разностью температур и теплопроводностью материалов. Теплопроводность материала, принятую для средней температуры каждого слоя, можно считать практически постоянной на всей поверхности рассматриваемого участка. Так как выполнение экранов из гладких труб с относительным шагом $a=s/d=1$ (без зазора между трубами) технологически невозможно из-за наличия сварных стыков, определение рабочей температуры на поверхности обмуровки производят по заданному относительному шагу для каждого экрана.

Температура поверхности обмуровки зависит от степени черноты факела ϵ_1 , определение которой достаточно сложно. Тепловой расчет обмуровки не может претендовать на высокую точность и служит в основном для выбора изоляционных материалов и для оценки потерь теплоты через ограждения во внешнюю среду.

Значения степеней черноты факела можно заимствовать из теплового расчета котла. Ориентировочные

значения степеней черноты факела ϵ_1 приведены ниже:

Характер пламени	ϵ_1
Несветящиеся пламя природного газа и пламя антрацита при слоевом сжигании	0,40
Светящиеся пламя антрацитового пыли . . .	0,45
Светящиеся пламя тощих углей	0,60
Светящиеся пламя твердых топлив, богатых летучими примесями (каменных и бурых углей, торфа и т. п.), сжигаемых в слое и в виде пыли	0,70
Состоящие пламя мазута	0,85

Значения степеней черноты полного излучения можно принять следующими:

Наименование материала	$t, ^\circ\text{C}$	ϵ_0
Асбестовая бумага (картон)	40—370	0,93—0,945
Кирпич шамотный глазурированный (оплавленная поверхность)	1100	0,75
Кирпич огнеупорный неоплавленный	—	0,8—0,9
Кирпич диатомовый термоизоляционный	—	0,9
Сталь окисленная при температуре до 600°C (трубы)	200—600	0,8
Окис железа (окалина)	500—1200	0,85—0,95

При отсутствии теплового расчета котла в качестве температуры факела можно принимать величину

$$T_1 = \sqrt{T_1' T_1}, \quad (9-15)$$

где T_1 — температура горения топлива, примерно равна $0,8$ теоретической, К; T_1' — температура газов, покидающих топку (перед входом в пароперегреватель), К.

При наличии в первом газоходе котла поверхностей нагрева в виде ширм температуру на поверхности обмуровки газохода следует принимать равной полусумме температур входа и выхода газов из газохода (ширмы устанавливаются с большим шагом, примерно равным 500—600 мм, и поэтому незначительно влияют на температуру поверхности обмуровки).

При расчете обмуровки за максимальную температуру ее поверхности следует принимать:

1. Для неэкранированных газоходов — температуру газов, входящих в газоход; при наличии холодных поверхностей — температуру, определяемую по формуле (9-14). При выборе материала футеровки для неэкранированных топков надежнее принимать $T_1 = T_1$.

2. Для экранированных стен топок и газоходов — температуру на средней линии между двумя соседними трубами в наиболее горячей зоне газохода, определяемую по формуле (9-12), а для случаев $l > l_{\text{ср}}$ — по формулам (9-8) и (9-9). Для топочных устройств наиболее горячей зоной является пояс обмуровки, находящийся против ядра факела. В этой зоне за температуру факела можно принимать теоретическую температуру горения ($T_1 \approx T_r$). Средняя температура факела для топки в целом определяется по формуле (9-15). Для расчета обмуровки потолочного перекрытия топки следует принимать $T_1 \approx T_1'$. Для расчета обмуровки стен шлаковой воронки при сухом шлакоудалении

$$T_1 = \sqrt{T_r T_{\text{х.в}}} \quad (9-15a)$$

где $T_{\text{х.в}} = t_{\text{х.в}} + 273$ — температура газов в воронке; $t_{\text{х.в}}$ обычно равна 800—900°C.

Наибольшая температура при сжигании мазута может быть на поверхности обмуровки неэкранированной топки при $t_r \approx 2000^\circ\text{C}$ и температуре газов, покидающих топку, $t_1' = 1300^\circ\text{C}$; эта средняя температура на поверхности обмуровки составит:

$$T_1 = \sqrt{T_r T_1'} = \sqrt{2273 \cdot 1573} = 1890 \text{ K},$$

или около 1600°C.

9-6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ ГЛАДКОЙ ТРУБЫ

Для определения температуры на поверхности обмуровки экранированной стены необходимо знать среднюю наружную температуру экранных труб.

Наружная температура чистой стенки гладкой трубы экрана рассчитывается по известной формуле [9-4]

$$t_2 = t_{\text{ср}} + q\beta \left(\frac{1}{\alpha_2} + 2 \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda} \frac{1}{\beta + 1} \right) \mu, \quad (9-16)$$

где $t_{\text{ср}}$ — температура среды внутри трубы, °C; q — тепловой поток, воспринимаемый трубой, ккал/(ч·м²); $\beta = d_{\text{н}}/d_{\text{вн}}$ — отношение наружного диаметра трубы к внутреннему; $\delta_{\text{ст}}$ — толщина стенки трубы, м; λ — коэффициент теплопроводности материала трубы, ккал/(м·ч·°C); α_2 — коэффициент теплоотдачи от внутренней

среды к стенке трубы, ккал/(ч·м²·°C); μ — коэффициент растечки теплоты, который для настенных экранных труб можно принимать равным единице.

Средние значения тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи для поверхностей нагрева котлов высокого давления приведены ниже:

Вид поверхности нагрева	$q \cdot 10^{-4}$ ккал/(ч·м²)	$\alpha_2 \cdot 10^{-3}$ ккал/(ч·м²·°C)
Экранные поверхности, расположенные в топочной камере	15—41	8—15
Конвективные пароперегреватели	2,5—3	1,5—2
Радиационные пароперегреватели	10—12	2—2,5
Экономайзерные поверхности	2—3	1—2

По нормам расчета на прочность элементов паровых котлов [3-3] температура стенок различных поверхностей нагрева принимается следующей, °C:

1. В котлах с естественной циркуляцией независимо от рабочего давления и в котлах с принудительной циркуляцией при $p_{\text{раб}} \leq 160$ кгс/см² для кипящих труб

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{ср}} + 60.$$

Для котлов с многократной принудительной циркуляцией при $p_{\text{раб}} > 160$ кгс/см² температура стенки определяется тепловым и гидравлическим расчетами.

2. Для конвективных и радиационных пароперегревателей — согласно тепловому и гидравлическому расчетам

$$t_{\text{ст}} \geq t_{\text{пн}} + 80.$$

3. Для труб конвективных пароперегревателей при $p_{\text{раб}} \leq 25$ кгс/см² и $t_{\text{ср}} \leq 425^\circ\text{C}$

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{пн}} + 70.$$

4. Для труб водяных экономайзеров котлов с естественной и многократной принудительной циркуляцией

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{ср}} + 30.$$

5. Для водяных экономайзеров прямоточных котлов

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{ср}} + \Delta t_{\text{разв}} + 40.$$

В приведенных формулах $t_{\text{ср}}$, $t_{\text{пн}}$ — температура среды и перегретого пара, °C; $\Delta t_{\text{разв}}$ — разверка температуры в отдельных трубах.

Непосредственные измерения показали, что температура тыльной части экранных труб [6-5] ниже расчетной

дуемой нормами расчета на прочность и приводит к охлаждению обмуровки за трубами, особенно при плотном соприкосновении труб с обмуровкой. По данным измерений температура тыльной части экранных труб, расположенных вплотную к обмуровке и имеющих тесный шаг $s/d \leq 1,10$, близка к температуре среды в трубе $t_{ср}$. Для этих случаев, учитывая возможную разверку шагов экранных труб, рекомендуется при расчетах обмуровки принимать температуру

$$t_{ст} = t_{ср} + 30.$$

Температура на поверхности обмуровки за экранными трубами со стальной обшивкой, за трубами с плавниками и за ошпированными трубами, по которым наносятся набивные массы, определяется экспериментом, а для плавниковых экранов определяется расчетным путем.

9-7. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ТОЛЩИНЕ ПЛОСКИХ И ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОГРАЖДЕНИЙ

Для расчета распределения температуры по толщине ограждения, состоящего из отдельных слоев, необходимо знать тепловой поток, проходящий через принятую кон-

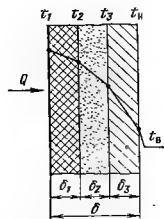


Рис. 9-15. Простая конструкция ограждения.

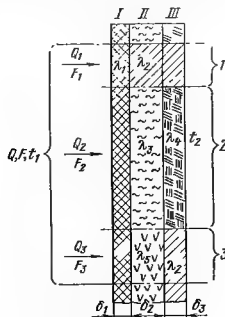


Рис. 9-16. Сложная конструкция ограждения.

струкцию стенки. Конструкции ограждений бывают различные:

1. Простые, состоящие из последовательно расположенных слоев одинаковой толщины, перпендикулярных тепловому потоку (рис. 9-15).

2. Сложные, состоящие из отдельных участков, выполненных из различных материалов и расположенных параллельно тепловому потоку (рис. 9-16).

3. С теплопроводными включениями в виде металлических ребер, штырей и т. д.

Простая обмуровка с последовательным расположением слоев

Последовательное расположение слоев имеет наибольшее распространение в обмуровке современных котлов. Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности обмуровки плоской стенки, определяется из формулы

$$q = \frac{t_{в.п} - t_{в}}{\Sigma R}, \quad (9-17)$$

где $t_{в.п}$ — средняя температура на внутренней поверхности, °C; $t_{в}$ — температура окружающего воздуха, °C; ΣR — суммарное термическое сопротивление обмуровки и сопротивление переходу теплоты от наружной стенки к воздуху.

В общем виде суммарное термическое сопротивление равно:

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (9-18)$$

где $R_1 = \delta_1/\lambda_1$; $R_2 = \delta_2/\lambda_2$; $R_3 = \delta_3/\lambda_3$; $R_n = 1/\alpha_n$; δ_n — толщина отдельных слоев обмуровки, м; λ_n — коэффициент теплопроводности каждого слоя при средней температуре его, ккал/(м·ч·°C); α_n — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности обмуровки к воздуху, ккал/(ч·м²·°C).

Так как тепловой поток последовательно проходит через все слои обмуровки, то можно написать:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R_1} = \frac{t_2 - t_3}{R_2} = \frac{t_3 - t_4}{R_3} = \frac{t_n - t_n}{R_n}. \quad (9-19)$$

Зная тепловой поток, из уравнения (9-17) можно определить температуру на плоскостях соприкосновения двух соседних слоев:

$$t_n = t_{n-1} - qR_n, \quad (9-20)$$

или

$$t_n = t_0 + qR_n,$$

где t_n — температура наружной поверхности обмуровки.

Параллельное расположение слоев (сложная обмуровка)

Точный расчет стенки, показанной на рис. 9-16, сложен, поэтому для практических целей используют приближенные способы расчетов с принятым допущением о постоянстве температуры на внутренней и внешней поверхностях стенки. При этом допущении сложная стенка может быть рассчитана двумя способами [9-5]:

1 способ. В стенке выделяют участок и делят его на слои, параллельные тепловому потоку: 1, 2, 3 и т. д. Площадь рассматриваемой стенки равна сумме площадей участков, на которые разделена стенка:

$$\Sigma F = F_1 + F_2 + \dots + F_n.$$

Полное количество теплоты, проходящее через стенку, равно сумме потоков теплоты, проходящих через параллельные слои:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n.$$

Обозначив термическое сопротивление каждого параллельного слоя через R_1, R_2, R_3 и R_n , равенство потоков теплоты можно выразить следующим образом:

$$\frac{t_1 - t_2}{R^*} \Sigma F = \frac{t_1 - t_2}{R_1} F_1 + \frac{t_1 - t_2}{R_2} F_2 + \dots + \frac{t_1 - t_2}{R_n} F_n,$$

где R^* — среднее термическое сопротивление всей стенки.

Сократив в последнем равенстве разность температур, получим:

$$\frac{\Sigma F}{R^*} = \frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2} + \frac{F_3}{R_3} + \dots + \frac{F_n}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i},$$

откуда среднее термическое сопротивление всей стенки

$$R^* = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i}}. \quad (9-21)$$

II способ. Выделенный участок стенки делят на слои, перпендикулярные потоку теплоты: I, II, III и т. д. (рис. 9-16).

Для каждого слоя определяют его термическое сопротивление:

для первого слоя

$$R_1 = \delta_1 / \lambda_1;$$

для второго слоя

$$\frac{\Sigma F}{R_{II}} = \frac{F_1}{R'_2} + \frac{F_2}{R'_3} + \frac{F_3}{R'_6},$$

где R'_2, R'_3, R'_6 — термические сопротивления участков, которые соответствуют площадям F_1, F_2 и F_3 в слое II, перпендикулярном потоку теплоты;

для третьего слоя

$$\frac{\Sigma F}{R_{III}} = \frac{F_1}{R'_2} + \frac{F_2}{R'_4} + \frac{F_3}{R'_2}.$$

Полное сопротивление участка при таком делении стенки

$$R^{**} = R_1 + R_{II} + R_{III}. \quad (9-22)$$

Как показывают исследования, значения R^* и R^{**} оказываются крайними; истинное значение термического сопротивления стенки R находится между ними:

$$R^* < R < R^{**}.$$

Так как R^{**} лежит ближе к истинному значению, то для расчета рекомендуется принимать не среднее арифметическое, а среднее параболическое между R^* и R^{**} :

$$R = \frac{R^* + 2R^{**}}{3}. \quad (9-23)$$

Расчет сложной стенки применяется для ограждений, состоящих из огнеупорного и диатомового кирпича с на-

ружным изоляционным слоем. Кирпичи в этих конструкциях уложены в перевязку и образуют участки с различными термическими сопротивлениями. Среднее значение теплового потока для сложной стенки определяется по формуле

$$q = \frac{t_1 - t_n}{R + R_n}.$$

По значению q можно определить примерное распределение температуры по слоям отдельных участков.

При тепловом расчете обмуровки встречаются две задачи:

1. По заданным t_1 и t_n и потерям теплоты $q_{\text{зид}}$ необходимо сконструировать ограждение котла при условии, что наружная температура ограждения t_n не должна превосходить нормированного значения.

2. По заданным t_1 и t_n ; $\Sigma \delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n$ необходимо произвести поверочный расчет обмуровки и определить температуру на ее наружной поверхности и потери теплоты q .

При решении первой задачи вначале проверяется выполнение условия

$$q = \alpha_n (t_n - t_n) \leq q_{\text{зад}},$$

где коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности к воздуху $\alpha_n = f(t_n)$. По значению $q_{\text{зад}}$ определяют необходимое термическое сопротивление $R = \frac{q_{\text{зад}}}{t_1 - t_n}$ само-

го ограждения, по значению которого подбирают термические сопротивления отдельных слоев с учетом температуры, допустимой для материалов каждого слоя: $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

Для поверочного расчета задаются средними температурами отдельных слоев и наружной температурой, определяют $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и т. д. и α_n .

Далее подсчитывают полное сопротивление

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_n$$

и тепловой поток

$$q = \frac{t_1 - t_n}{\Sigma R}.$$

По значению теплового потока определяют температуры между отдельными слоями $t_2, t_3, \dots, t_n$ и уточняют $\lambda_1,$

$\lambda_2, \dots, \lambda_n$ и t_n , после чего расчеты повторяют снова до получения результатов, которые совпали бы с значениями, принятыми предварительно, с точностью 5–10%.

Расчет цилиндрических ограждений

Цилиндрические газоходы с обмуровкой обычно выполняются для отбора газов из топок и конвективных газоходов, для сушки влажных топлив и рециркуляции газов. Если диаметр этих газоходов более 2 м, то потери теплоты и распределение температур по толщине их ограждений можно определять по формулам для плоских стенок.

Для цилиндрических ограждений (рис. 9-17) потери теплоты обычно определяют на 1 м длины по формуле [7-12]

$$q_l = \frac{t_{\text{ср}} - t_n}{R_{\text{лв}} + \sum_{i=1}^n R_l + R_{\text{лв}}}, \quad (9-24)$$

где $t_{\text{ср}}$, t_n — температура среды внутри газохода и наружного воздуха, °C; $R_{\text{лв}}$, $R_{\text{лв}}$ — термические сопротивления переходу теплоты от внутренней среды к стенке и от стенки к наружному воздуху; $\sum_{i=1}^n R_l$ — сумма термических сопротивлений сложной цилиндрической стенки, каждое из сопротивлений и их сумма отнесены к 1 м длины.

Значения этих термических сопротивлений находят из следующих выражений:

$$R_{\text{лв}} = \frac{1}{\pi D_{\text{лв}} \alpha_{\text{лв}}}; \quad (9-25)$$

$$R_{\text{лв}} = \frac{1}{\pi D_{\text{лв}} \alpha_{\text{лв}}}; \quad (9-26)$$

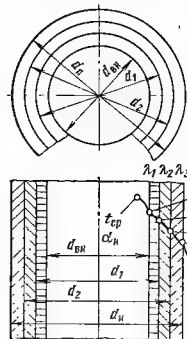


Рис. 9-17. Цилиндрические ограждения.

$$\sum_{i=1}^n R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_1} \lg \frac{D_i}{D_{вн}} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{D_2}{D_i} + \dots$$

$$\dots \frac{1}{2\pi\lambda_n} \frac{D_n}{D_{n-1}}, \quad (9-27)$$

где $\alpha_{вн}$ и $\alpha_{вн}$ — коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке внутри газохода и от стенки к наружному воздуху; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — коэффициенты теплопроводности соответствующих слоев ограждения. Распределение температур в ограждении определяется следующими соотношениями, °C:

$$\text{на внутренней поверхности газохода} \quad t_1 = t_{ср} - q_1 R_{вн}; \quad (9-28)$$

$$\text{на наружной поверхности ограждения} \quad t_{нар} = t_{ср} - q_1 (\Sigma R_i + R_{вн}); \quad (9-29)$$

$$\text{между отдельными слоями} \quad t_2 = t_1 - q_1 R_{i1}; \quad t_3 = t_2 - q_1 R_{i2} \quad (9-30)$$

и т. д.

Определение потерь теплоты 1 м² наружной поверхности производится по формуле

$$q = \frac{q_1}{\pi D_n}.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху можно с достаточной точностью принимать таким же, как и для плоской стенки, так как при больших внешних цилиндрических газоходах их диаметр мало влияет на коэффициент теплоотдачи.

9-8. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В современных натрубных обмуровках применяются ребра и штыри, служащие для крепления изоляционных материалов. Ребра (рис. 9-18) и штыри (рис. 9-19) располагаются в определенном порядке с постоянным шагом. Расчет ограждений с металлическими включениями сводится к оценке их влияния на потери теплоты по сравнению с ограждениями без включений. Решения такой задачи при определенных допущениях возможно

только для правильного и регулярного расположения в обмуровке металлических ребер и штырей. Для расчета потерь теплоты через стенку с ребрами делают следующие допущения [9-6, 9-7]:

1. Температура ребра постоянна по его длине и ширине и равна температуре основания.

2. Тепловой поток от боковых поверхностей ребер идет по цилиндрическим поверхностям, центральная ось которых лежит в основании двугранных углов ребер (рис. 9-18).

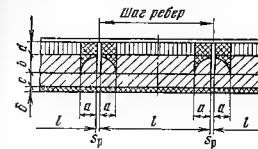


Рис. 9-18. Влияние ребер на передачу теплоты через ограждение.

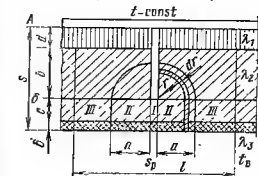


Рис. 9-19. Штыревое крепление изоляции.

3. На участках стенки вне цилиндрических поверхностей тепловой поток не искривлен и распространяется прямолинейно. При этом сопротивлением между ребрами и обмуровкой пренебрегают и считают, что теплообмена на границах зон не происходит.

Рассматривая общий случай, выделим участок стенки высотой $H=1$ м с ребрами. Ширину стенки принимаем равной шагу l между ребрами. При принятых допущениях ширина стенки l делится на три зоны (рис. 9-18), каждая из которых соответствует своему тепловому потоку. Зона I— $F_1=s_p$ (толщина ребра); зона II— $F_2=2a$; зона III— $F_3=l-s_p-2a$.

Площадь выделенного участка, м²:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = Hl = l.$$

Через каждую зону проходит свой тепловой поток, полная величина теплового потока для выделенного участка:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Ширина зоны II, равная $2a$, находится из условия, что тепловой поток всегда распространяется по кратчайшему пути: от линии А-А (основания ребра) до линии В-В (конца ребра) ($b+d$), поэтому радиус a внешней поверхности потока теплоты от ребра найдется из равенства термического сопротивления дуги $\pi a/2$ и толщины слоя $b+d$:

$$\frac{\pi a}{2\lambda_2} = \frac{d}{\lambda_1} + \frac{b}{\lambda_2},$$

откуда получим:

$$a = \frac{2}{\pi} \lambda_2 \left(\frac{d}{\lambda_1} + \frac{b}{\lambda_2} \right) = \frac{2}{\pi} \left(d \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + b \right). \quad (9-31)$$

Это равенство справедливо при условии $a \leq b$, что обычно имеет место.

Нетрудно видеть, что при принятых допущениях в объеме изоляции, показанной двойной штриховкой, теплообмен отсутствует. Термическое сопротивление для зоны I

$$R_I = \frac{c}{\lambda_a} + \frac{\delta}{\lambda_a} + \frac{1}{\alpha_n};$$

для зоны III

$$R_{III} = \frac{d}{\lambda_1} + \frac{b+c}{\lambda_2} + \frac{\delta}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n}.$$

Полное термическое сопротивление зоны II

$$R_{II} = \frac{\pi a}{2\lambda_2 \ln \left[\frac{a\pi\lambda_3}{2(c\lambda_2 + \delta\lambda_2)} + 1 \right]} + \frac{1}{\alpha_n}. \quad (9-32)$$

Если известны температура t_1 на уровне А-А, температура внешней среды t_n и термические сопротивления каждой из зон R_I , R_{II} , R_{III} , то потери теплоты и наружные температуры t_{n1} , t_{n2} и t_{n3} определяются по соответствующим тепловым потокам:

$$Q_1 = \frac{t_1 - t_n}{R_I}; \quad Q_2 = \frac{t_1 - t_n}{R_{II}}; \quad Q_3 = \frac{t_1 - t_n}{R_{III}}.$$

Потери теплоты, отнесенные к 1 м^2 поверхности ограждения (при $H=1 \text{ м}$),

$$q = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{l}.$$

При расчете потерь теплоты через стенку со штырями (рис. 9-20) будем исходить из тех же допущений, что и при расчете ребер, откуда следует, что тепловой поток от штырей распространяется по сферическим поверхностям. Выделим участок стены F , на котором расположено n штырей, и делим его на три зоны. Площадь первой зоны $F_1 = n f$, где $f = \pi d^2/4$ — площадь сечения одного штыря. Площадь второй зоны

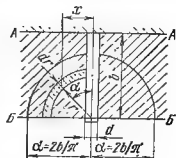


Рис. 9-20. Влияние штыревого крепления на передачу теплоты через ограждение.

$$F_2 = n \frac{\pi(a^2 - d^2)}{4},$$

где a — радиус внешней сферической поверхности; $F_3 = F - (F_1 + F_2)$ — площадь третьей зоны.

Радиус внешней поверхности находится из условия кратчайшего пути теплового потока

$$\frac{\pi r}{2} = \frac{d}{2} = b,$$

откуда

$$r = \frac{2b + d}{\pi}.$$

Так как диаметр штыря d мал по сравнению с величиной $2b$, то для упрощения вывода можно принять, что $r \approx 2b/\pi$.

Термическое сопротивление второй зоны R_2 находится также, как и для ребра.

Полное термическое сопротивление второй зоны

$$R_2 = \frac{\pi^2(a^2 - d^2)}{8\lambda_2(4b - \pi d)} + R_{шт} + \frac{1}{\alpha_n}. \quad (9-33)$$

Диаметр стержня d по сравнению с размерами a и b мал, и им можно пренебречь. Тогда

$$R_2 = \frac{a^2}{3,2\lambda b} + R_{шт} + \frac{1}{\alpha_b}, \quad (9-34)$$

где $R_{шт}$ — термическое сопротивление слоя штукатурки.

Примеры расчетов ограждений с теплопроводными включениями рассмотрены ниже.

9-9. РАСЧЕТ НА ЦИФРОВЫХ ЭВМ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Приведенный выше приближенный расчет влияния теплопроводных металлических включений на тепловые потери через ограждение в окружающую среду не может быть применен для учета влияния бетонных теплопроводных включений. В ряде случаев расчет по приве-

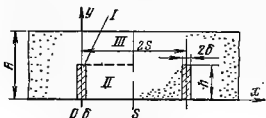


Рис. 9-21. Расчетная схема для решения задачи теплопроводности составного ограждения со сквозными и несквозными включениями прямоугольной формы.

денным приближенным формулам не обеспечивает требуемой точности. Для более точной оценки теплопроводности составного ограждения требуется проведение более сложных аналитических расчетов с применением электронно-вычислительных машин [9-8, 9-9]. Ниже рассматривается аналитическое решение стационарной задачи для составного ограждения со сквозными и несквозными теплопроводными включениями прямоугольной формы [9-10]. Расчетная схема задачи показана на рис. 9-21.

Задача теплопроводности составного ограждения решена методом Фурье. Расчетная схема представляет модель двухслойной ограждающей стенки с теплопроводными включениями, расположенными по направлению теплового потока до плоскости стыка двух слоев. Такая схема позволяет производить оценку растечки теплоты по штукатурке или обшивке вблизи теплопроводного включения. В предельном случае при $h=H$ и $\lambda_2=\lambda_3$ задача сводится к отысканию температурного поля в однослойной однородной пластине со сквозным теплопро-

водным включением. Расчетный элемент конструкции ($0 \leq x \leq s$; $0 \leq y \leq H$), разбивается на три прямоугольные области: ($0 \leq x \leq \delta$; $0 \leq y \leq h$), ($\delta \leq x \leq s$; $0 \leq y \leq h$), ($0 \leq x \leq s$; $h \leq y \leq H$). Решение позволяет получить температурное поле в любой интересующей нас области обмуровочной конструкции и может быть использовано для расчета температурных напряжений в ограждении.

Для расчета теплозащитных свойств конструкции рассмотрим поле температур по наружной поверхности составного ограждения. Поле температур в расчетной области III, выраженное в безразмерных перепадах температур, имеет вид ¹:

$$\theta_3 = \left(y - H - \frac{\lambda_3}{\alpha} \right) \frac{\lambda_1 \delta + \lambda_2 (s - \delta)}{\lambda_3 s} a_0 + \sum_{n=1}^m b_n \left[c_n \exp \left(-\frac{y - 2H}{s} n\pi \right) + \exp \left(-\frac{n\pi}{s} y \right) \right] \cos \frac{n\pi}{s} x, \quad (9-35)$$

где

$$\theta_3 = \frac{t_3 - t_b}{t_{вн} - t_b}. \quad (9-36)$$

Выражение (9-35) позволяет определить максимальную температуру $\theta_{\max}$ при $y=H$, $x=0$ и средненитегальную температуру наружной поверхности обмуровки $\theta_{ср}$ на участке $0 \leq x \leq s$ при $y=H$.

Полученное аналитическое выражение из-за его сложности не может быть использовано для инженерных расчетов. Для решения задач теплопроводности составной обмуровочной конструкции составлена программа на цифровой ЭВМ «Минск-22». По результатам машинных расчетов построены графические зависимости, которые могут быть использованы при оценке тепловой работы конструкции обмуровки с теплопроводными включениями. Графики для определения $\theta_{\max}$ и $\theta_{ср}$ даны на рис. 9-22, 9-23 для случая $\lambda_2=\lambda_3$, т. е. при отсутствии наружного покрытия. При наличии наружной металлической обшивки (когда $\lambda_2 \neq \lambda_3$) безразмерные перепады температур $\theta_{\max}$ и $\theta_{ср}$ определяются из рис. 9-24.

¹ Выражения для определения коэффициентов a_0 , b_n , c_n здесь не приводятся.

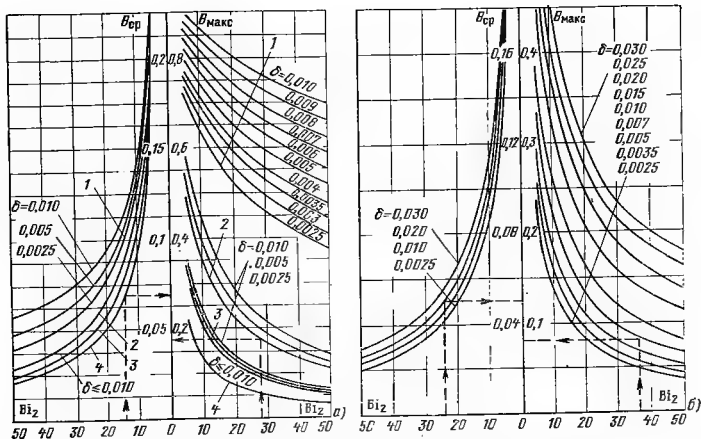


Рис. 9-22. Значения $\theta_{\max}$ и $\theta_{\text{ср}}$ для составного ограждения.

α — сквозные и несквозные металлические включения ($\lambda_1/\lambda_2=330:400$): 1 — $h/H=1.0$; 2 — $h/H=0.9$; 3 — $h/H=0.75$; 4 — $h/H=0.5$; б — сквозное ($h/H=1.0$) неметаллическое включение ($\lambda_1/\lambda_2=8\div 10$).

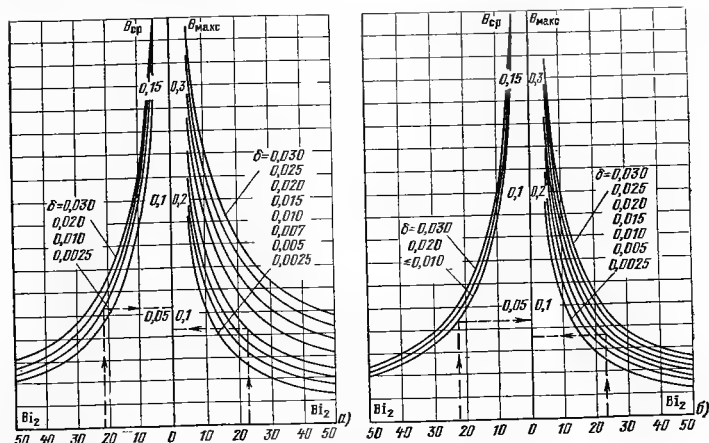


Рис. 9-23. Значения $\theta_{\max}$ и $\theta_{\text{ср}}$ для составного неметаллического ($\lambda_1/\lambda_2=8\div 10$) включения.
а — $h/H=0.9$; б — $h/H=0.75$.

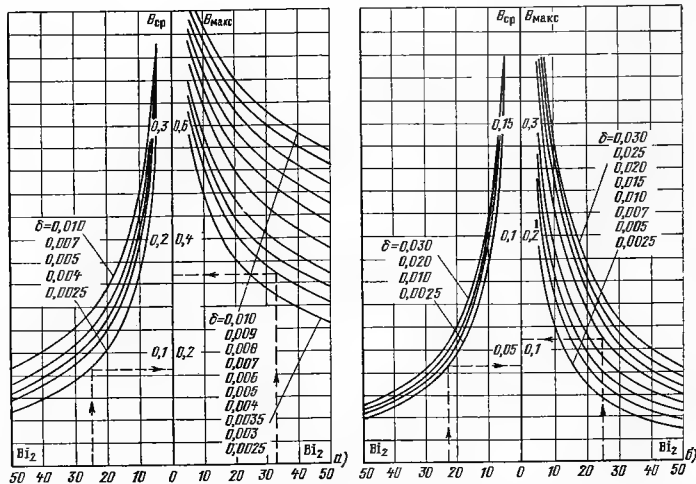


Рис. 9-24. Значения $\theta_{\text{макс}}$ и $\theta_{\text{ср}}$ для составного ограждения с наружной металлической обшивкой.

а — металлические ($\lambda_1/\lambda_2 = 380 \div 400$) сквозные включения ($h/H = 1,0$); б — неметаллические ($\lambda_1/\lambda_2 = 8 \div 10$) сквозные включения ($h/H = 1,0$).

Максимальная температура наружной поверхности составной обмуровки $t_{\text{макс}}$, а также наружная среднеинтегральная температура $t_{\text{ср}}$ определяются по $\theta_{\text{макс}}$ и $\theta_{\text{ср}}$ с использованием выражения (9-36):

$$t_{\text{макс}} = \theta_{\text{макс}}(t_{\text{вн}} - t_{\text{в}}) + t_{\text{в}}; \quad (9-37)$$

$$t_{\text{ср}} = \theta_{\text{ср}}(t_{\text{вн}} - t_{\text{в}}) + t_{\text{в}}. \quad (9-38)$$

Если учитывать, что в обмуровочных конструкциях шаг включений, как правило, велик и практически не влияет на $\theta_{\text{макс}}$, графики построены при постоянном значении $s=0,5$ м. При s больше или меньше 0,5 в расчет $t'_{\text{ср}}$ вводится поправка:

$$t'_{\text{ср}} = \frac{0,5t_{\text{ср}} + t_{\text{нар}} \Delta s}{0,5 \pm \Delta s}, \quad (9-39)$$

где $t_{\text{ср}}$ — значение среднеинтегральной температуры наружной поверхности обмуровки при $s=0,5$ м; $t_{\text{нар}}$ — температура наружной поверхности однородной стенки без учета включений; Δs — поправка на s . Аналогично вводится поправка на ширину бетонных включений в тех случаях, когда δ конструкции превышает 0,03 м.

Номограммы для безразмерных перепадов температур $\theta_{\text{макс}}$ и $\theta_{\text{ср}}$ построены в зависимости от числа Био для плоской стенки (Bi_2). В общем случае для многослойной стенки выражение для числа Био имеет вид:

$$Bi_2 = \alpha \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i}, \quad (9-40)$$

где α — коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, ккал/(ч·м²·°С); $h_1, h_2, \dots, h_n$ — толщины отдельных слоев обмуровки, м; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — теплопроводность соответствующего слоя, ккал/(м·ч·°С).

9-10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

В общем случае коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху состоит из двух величин:

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{с}}, \quad (9-41)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией; $\alpha_{\text{с}}$ — коэффициент теплоотдачи излучением.

Для поверхностей, находящихся внутри зданий, коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции при

$\Delta t = t_n - t_b > 5^\circ\text{C}$ равен:

для вертикальной плоской поверхности

$$\alpha_k = 2,2 \sqrt[4]{\Delta t}; \quad (9-42)$$

для горизонтальной плоской поверхности

$$\alpha_k = 2,8 \sqrt[4]{\Delta t}. \quad (9-43)$$

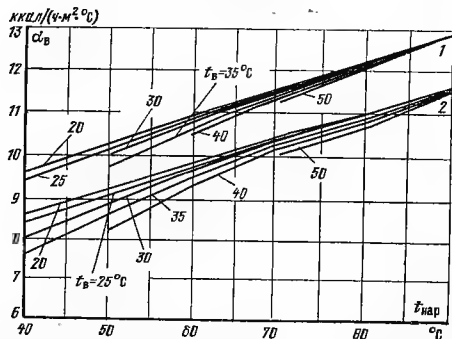


Рис. 9-25. Коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху в зависимости от температуры $t_{\text{нар}}$ и температуры окружающей среды $t_{\text{вср}}$. 1 — для штукатурки [$\alpha_k = 4,5$ ккал/(ч·м²·°C)]; 2 — для металлической обшивки [$\alpha_k = 3,6$ ккал/(ч·м²·°C)].

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$\alpha_r = \frac{c \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right] \epsilon}{t_n - t_b}, \quad (9-44)$$

где $T_n = t_n + 273$; $T_b = t_b + 273$; c — постоянная излучения (при $t_n = 100^\circ\text{C}$), имеющая следующие значения:

Материал	c , ккал/(ч·м²·°C)
Стальная обшивка	3,5—4,0
Строительный красный кирпич	4,6
Шероховатая штукатурка	4,2—4,3
Алюминевые листы (неполированные)	2,0—2,5

На рис. 9-25 дан график для определения α_b .

Для упрощенных расчетов суммарный коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху с достаточной точностью может приниматься равным, ккал/(ч·м²·°C):

$$\alpha_b = 8,4 + 0,06 (t_n - t_b). \quad (9-45)$$

В среднем для обмуровок котлов, расположенных внутри зданий, $\alpha_b = 10$ ккал/(ч·м²·°C). Для алюминиевой обшивки коэффициент теплоотдачи к воздуху уменьшится до 4—5 ккал/(ч·м²·°C), так как постоянная излучения для алюминиевой обшивки примерно в 2 раза меньше.

Коэффициент теплопроводности, ккал/(ч·м·°C), обмуровочных и изоляционных материалов определяется в зависимости от рабочей температуры по формуле

$$\lambda = a + b t_{\text{ср}}$$

где a и b — постоянные коэффициенты; $t_{\text{ср}}$ — средняя рабочая температура материала.

Значения λ даны в приложении 3.

Коэффициенты теплопроводности для наиболее распространенных марок трубных сталей в зависимости от температуры даны на рис. 9-26.

9-11. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ОБМУРОВОК

Пример 9-6. Рассчитать обмуровку топочной камеры со сложным экраном, состоящим из кирпичных и пароперегревательных труб. Геометрические характеристики экрана показаны на рис. 9-27; температура стенок кирпичных труб $t_{\text{пк}} = 360^\circ\text{C}$; температура стенок труб пароперегревателя $t_{\text{пг}} = 500^\circ\text{C}$; температура факела в топке $t_0 = 1430^\circ\text{C}$; степень черноты факела (топливо АШ) $\epsilon_1 = 0,45$; степень черноты обмуровки и труб $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0,8$; абсолютные температуры: $T_1 = 1430 + 273 = 1703$ К; $T_{\text{пк}} = 360 + 273 = 633$ К; $T_{\text{пг}} = 500 + 273 = 773$ К.

Решение. Угловой коэффициент для сложного экрана определяем по формуле (9-4) графо-аналитическим методом, вычертив эк-

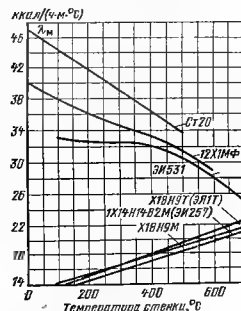


Рис. 9-26. Коэффициент теплопроводности сталей в зависимости от температуры.

ран в натуральную величину. Угловой коэффициент между факелом и трубой пароперегревателя (рис. 9-27, а)

$$\bar{\varphi}_{12n} = \frac{[(1-4-6) + (3-5-10)] - [(1-2-3) + (6-7-8-9-10)]}{2s} = \frac{(93 + 134) - (60 + 98)}{2 \cdot 154} = 0,224.$$

Угловой коэффициент между факелом и кипятильной трубой (рис. 9-27, б)

$$\bar{\varphi}_{12k} = \frac{[(1-11) + (1-10)] - [(11-12-13-14-10)]}{2s} = \frac{(66 + 154) - 148}{2 \cdot 154} = 0,234.$$

Суммарный угловой коэффициент

$$\bar{\varphi}_{12} = 2(\bar{\varphi}_{12n} + \bar{\varphi}_{12k}) = 2(0,224 + 0,234) = 0,916.$$

Угловой коэффициент между обмуровкой и трубой пароперегревателя (рис. 9-27, в)

$$\bar{\varphi}_{32n} = \frac{[(1-9-5) + (4-10-8)] - [(1-2-3-4) + (5-6-7-8)]}{2s} = \frac{(102 + 142) - (74 + 106)}{2 \cdot 154} = 0,207;$$

$$\bar{\varphi}_{32n} = 2\bar{\varphi}_{32n}^1 = 2 \cdot 0,207 = 0,414.$$

Угловой коэффициент между обмуровкой и кипятильной трубой (рис. 9-27, г)

$$\bar{\varphi}_{32k} = \frac{[(1-9-10) + (1-8)] - [(10-11-12-8)]}{2s} = \frac{(78 + 154) - 154}{2 \cdot 154} = 0,253;$$

$$\bar{\varphi}_{32k}^1 = 2\bar{\varphi}_{32k} = 2 \cdot 0,253 = 0,506.$$

Суммарный средний угловой коэффициент

$$\bar{\varphi}_{32} = 2(\bar{\varphi}_{32n} + \bar{\varphi}_{32k}) = 2(0,207 + 0,253) = 0,92.$$

Тогда средняя температура на поверхности обмуровки по формуле (9-8) равна:

$$T_B = \sqrt[4]{\frac{(1 - \bar{\varphi}_{12}) \varepsilon_1 T_1^4 + (\bar{\varphi}_{32n} T_{2k}^4 + \bar{\varphi}_{32n} T_{2n}^4) \varepsilon_2}{(1 - \bar{\varphi}_{32}) \varepsilon_1 + \bar{\varphi}_{32} \varepsilon_2}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0,916) \cdot 0,45 \cdot 1703^4 + (0,506 \cdot 633^4 + 0,414 \cdot 773^4) \cdot 0,8}{(1 - 0,916) \cdot 0,45 + 0,92 \cdot 0,8}} = 900 \text{ К или } 900 - 273 = 627^\circ \text{С}.$$

Участок обмуровки с максимальной температурой находится против труб пароперегревателя. Для того, чтобы решить, по какой формуле определить эту температуру, найдем предельное расстояние от этих труб до обмуровки по формуле (9-10):

$$l_{np} = \frac{d_n}{2} \sqrt{\frac{a_n^2}{a_n^2 - 1}} = \frac{32}{2} \sqrt{\frac{1,31^2}{1,31^2 - 1}} \approx 25 \text{ мм},$$

где $d_n = 32 \text{ мм}$; $s_n = 42 \text{ мм}$; $a_n = s_n/d_n = 42/32 = 1,31$.

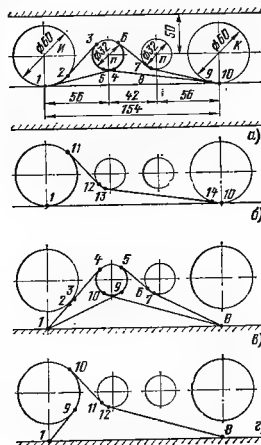


Рис. 9-27. К примеру 9-6.

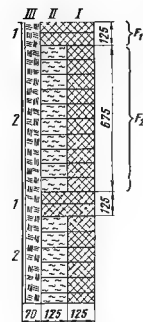


Рис. 9-28. К примеру 9-7.

Так как $l_{np} < l = 50 \text{ мм}$, то $T_{3 \text{ макс}}$ следует определять по формуле (9-9). Угловой коэффициент между факелом и трубами для шага $s = 42 \text{ мм}$ по формуле (9-5) составляет:

$$\bar{\varphi}_{12} = 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{a_n^2} + \frac{1}{a_n} \arctg \sqrt{a_n^2 - 1}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{1,31^2} + \frac{1}{1,31} \arctg \sqrt{1,31^2 - 1}} = 0,89.$$

Тогда

$$T_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - \varphi_{12}) \varepsilon_1 T_1^4 + \varphi_{12} \varepsilon_2 T_2^4}{(1 - \varphi_{12}) \varepsilon_1 + \varphi_{12} \varepsilon_2}} = \sqrt[4]{\frac{(1 - 0,89) \cdot 0,45 \cdot 1703^4 + 0,89 \cdot 0,8 \cdot 773^4}{(1 - 0,89) \cdot 0,45 + 0,89 \cdot 0,8}} = 960 \text{ К}$$

или $t_{2 \text{ макс}} = 960 - 273 = 687^\circ \text{С}$.

Разница между максимальной и средней температурами на поверхности обмуровки составляет:

$$687 - 627 = 60^\circ \text{С}.$$

Далее подбираем конструкцию ограждения топной камеры для заданных условий ($t_1 \approx 627^\circ \text{С}$ и температура окружающего воздуха $t_a = 25^\circ \text{С}$). Наружная температура обмуровки не должна превышать 55°С ; тепловой поток $q \leq 300 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$.

Пример 9-7. Провести поверочный расчет сложной обмуровки старой конструкции, состоящей из шамотной футеровки, теплоизоляционного кирпича и соевитовых плит с металлической обшивкой (рис. 9-28). Средняя температура на внутренней поверхности обмуровки $t_i = 500^\circ \text{С}$; температура окружающего воздуха $t_a = 30^\circ \text{С}$.

Решение. Предварительно зададим температурой на наружной поверхности $t_n = 70^\circ \text{С}$, которая принята в старых нормах ПТЭ, тогда коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху по формуле (9-45) равен

$$\alpha_n = 8,4 + 0,06(t_n - t_a) = 8,4 + 0,06(70 - 30) \approx 10 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С}).$$

Примем предварительно средние температуры для отдельных слоев обмуровки и вычислим коэффициенты теплопроводности: для шамотного кирпича при $t_{\text{ср}} = 500^\circ \text{С}$

$$\lambda_i = 0,64 + 0,0006 \cdot 500 = 0,94 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{С});$$

для диатомового кирпича при $t_{\text{ср}} = 400^\circ \text{С}$

$$\lambda_2 = 0,12 + 0,0002 \cdot 400 = 0,20 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{С});$$

для соевитовых плит при $t_{\text{ср}} = 200^\circ \text{С}$

$$\lambda_3 = 0,069 + 0,00008 \cdot 200 = 0,085 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{С}).$$

Выделим участок стены шириной 1 м и высотой $125 + 675 = 800 \text{ мм}$. Термическим сопротивлением обшивки пренебрегаем. Разделим участок на слои параллельно потоку теплоты:

$$\Sigma F = F_1 + F_2 = 0,125 + 0,675 = 0,8 \text{ м}^2.$$

Термическое сопротивление первого слоя (F_1)

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} = \frac{0,125}{0,94} + \frac{0,07}{0,085} = 0,266 + 0,82 = 1,08.$$

термическое сопротивление второго слоя (F_2)

$$R_2 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{0,125}{0,94} + \frac{0,125}{0,2} + \frac{0,07}{0,085} = 1,57.$$

Находим термическое сопротивление всего участка F по формуле (9-21)

$$R^* = \frac{\Sigma F}{\Sigma \frac{F}{R}} = \frac{0,8}{\frac{0,125}{1,08} + \frac{0,675}{1,57}} = \frac{0,8}{0,116 + 0,430} = 1,46.$$

Разделим теперь участок на слои, перпендикулярные потоку теплоты. Термическое сопротивление участка I ($F_I = 0,8 \text{ м}^2$)

$$R_I = \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{0,125}{0,94} = 0,133.$$

Термическое сопротивление участка II ($F_{II} = 0,8 \text{ м}^2$)

$$R_{II} = \frac{\Sigma F}{\Sigma \frac{F}{R}} = \frac{0,8}{\frac{0,125}{0,94} + \frac{0,675}{0,20}} = 0,23.$$

Термическое сопротивление участка III ($F_{III} = 0,8 \text{ м}^2$)

$$R_{III} = \frac{\delta_a}{\lambda_a} = \frac{0,07}{0,085} = 0,82.$$

Тогда термическое сопротивление всего участка по формуле (9-22) составит:

$$R^{**} = R_I + R_{II} + R_{III} = 0,133 + 0,23 + 0,82 = 1,183.$$

Расчетное термическое сопротивление стенки по формуле (9-23)

$$R = \frac{R^* + 2R^{**}}{3} = \frac{1,46 + 2,366}{3} = 1,27.$$

Средний тепловой поток через стену с учетом сопротивления теплоперевода к воздуху

$$q = \frac{t_i - t_n}{R + R_n} = \frac{500 - 30}{1,27 + \frac{1}{10}} = 343 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2),$$

где $R_n = 1/\alpha_n$.

Средняя температура на наружной поверхности стенки

$$t_n = t_a + qR_n = 30 + 343 \cdot 0,10 = 64^\circ \text{С}.$$

Из расчета видно, что старая обмуровка при температуре на ее внутренней поверхности $t_i \approx 500^\circ \text{С}$ не удовлетворяет рекомендуемым нормам для современных котлов, так как

$$q > 300 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2) \text{ и } t_n > 55^\circ \text{С}.$$

Определим, насколько увеличиваются потери теплоты стенкой из-за перевязки диатомовой кладки с шамотной футеровкой.

Термическое сопротивление стенки без перевязки с шамотной футеровкой

$$\Sigma R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_v} = \frac{0,125}{0,94} + \frac{0,125}{0,2} + \frac{0,07}{0,085} + \frac{1}{10} = 1,67.$$

Потери теплоты

$$q' = \frac{t_1 - t_v}{\Sigma R} = \frac{500 - 30}{1,67} = 281 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2).$$

Температура на наружной поверхности стенки

$$t_n = t_v + qR_v = 30 + 281 \cdot 0,1 \approx 58^\circ\text{C}.$$

Увеличение потерь теплоты

$$\Delta q = \frac{q - q'}{q'} = \frac{343 - 281}{281} \cdot 100 = 22\%.$$

Пример 9-8. Произвести расчет обмуровки для бесприсосной конвективной шахты, состоящей из стальной обшивки с ребрами, которая изолирована минераловатными плитами общей толщиной 100 мм и по металлической сетке покрыта асбестоцементной штукатуркой толщиной $\delta = 15$ мм. Температура на поверхности стальной обшивки $t_1 = 350^\circ\text{C}$; температура окружающего воздуха $t_v = 25^\circ\text{C}$; шаг между ребрами по вертикали $l = 500$ мм; толщина ребра $s_p = 5$ мм; высота $b = 50$ мм.

Рис. 9-29. Обмуровка бесприсосной конвективной шахты.

Решение. Выделим участок стены площадью $0,5 \times 1,0 \text{ м}^2$, на котором находится одно ребро (рис. 9-29), и разделим его на три зоны. Предварительно находим половину ширины зоны II с учетом того, что для заданного случая слой $d = 0$ (см. рис. 9-18) и $\lambda_1 = 0$:

$$a = \frac{2b}{\pi} = \frac{2 \cdot 50,0}{\pi} = 32 \text{ мм}.$$

Соответствующие площади зон равны:

$$F_1 = s_p H = 0,005 \cdot 1 = 0,005 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = 2aH = 2 \cdot 0,032 \cdot 1 = 0,064 \text{ м}^2;$$

$$F_3 = (l - s_p - 2a) H = (0,5 - 0,005 - 0,064) \cdot 1 = 0,431 \text{ м}^2;$$

$$\Sigma F = F_1 + F_2 + F_3 = 0,5 \text{ м}^2.$$

Коэффициенты теплопроводности:

для минераловатных плит при $t_{cp} = 200^\circ\text{C}$

$$\lambda_2 = 0,071 + 0,00016 \cdot 200 = 0,1 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C});$$

для асбестоцементной штукатурки при $t_{cp} = 50^\circ\text{C}$

$$\lambda_3 = 0,35 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Коэффициент теплоотдачи от стены к воздуху $\alpha_v = 10 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}).$

Термические сопротивления:

для зоны I

$$R_I = \frac{c}{\lambda_2} + \frac{\delta}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_v} = \frac{0,05}{0,1} + \frac{0,015}{0,35} + \frac{1}{10} = 0,643;$$

для зоны III

$$R_{III} = \frac{b+c}{\lambda_2} + \frac{\delta}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_v} = \frac{0,1}{0,1} + \frac{0,015}{0,35} + \frac{1}{10} = 1,143;$$

для зоны II по формуле (9-32)

$$R_{II} = \frac{\pi a}{2\lambda_2 \ln \left[\frac{\pi a \lambda_3}{2(c\lambda_3 + \delta\lambda_2)} + 1 \right]} + \frac{1}{\alpha_v} = \frac{\pi \cdot 0,032}{2 \cdot 0,1 \ln \left[\frac{0,032 \cdot 0,35 \pi}{2(0,05 \cdot 0,35 + 0,015 \cdot 0,1)} + 1 \right]} + \frac{1}{10} = \frac{0,5}{1,92} + 0,1 \approx 0,865.$$

Потери теплоты по зонам:

$$Q_1 = \frac{t_1 - t_v}{R_I} F_1 = \frac{350 - 25}{0,643} \cdot 0,005 = 2,5 \text{ ккал}/\text{ч};$$

$$Q_2 = \frac{t_1 - t_v}{R_{II}} F_2 = \frac{350 - 25}{0,865} \cdot 0,064 = 24 \text{ ккал}/\text{ч};$$

$$Q_3 = \frac{t_1 - t_v}{R_{III}} F_3 = \frac{350 - 25}{1,143} \cdot 0,431 = 122 \text{ ккал}/\text{ч}.$$

Потери теплоты через весь участок ($\Sigma F = 0,5 \text{ м}^2$)

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 2,5 + 24 + 122 = 148,5 \text{ ккал}/\text{ч}.$$

Потери теплоты, отнесенные к 1 м^2 поверхности обмуровки,

$$q = 2Q = 2 \cdot 148,5 = 297 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2).$$

Средняя температура наружной поверхности

$$t_n = t_v + R_v q = 25 + 0,1 \cdot 297 \approx 55^\circ\text{C}.$$

Определим потери теплоты, которые имели бы стенки с той же изоляцией, но без металлических ребер.

Термическое сопротивление стенки

$$R' = R_{III} = \frac{b+c}{\lambda_2} + \frac{\delta}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_v} = 1,143.$$

Потери теплоты

$$q' = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{в}}}{R'} = \frac{350 - 25}{1,143} = 283 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2).$$

Наружная температура стенки

$$t_{\text{п}} = t_{\text{в}} + R_{\text{в}} q' = 25 + 0,1 \cdot 283 = 53^\circ\text{C}.$$

Увеличение потерь теплоты через стенку с металлическими ребрами

$$\Delta q = \frac{297 - 283}{283} \cdot 100 \approx 5\%.$$

Определим увеличение тепловых потерь через ограждение (см. рис. 9-29) с помощью графических зависимостей, построенных по результатам расчетов на цифровых ЭВМ.

Геометрические и теплофизические характеристики ограждения принимаем прежними. Число Био для плоской стенки по формуле (9-40) составит:

$$\text{Bi} = \alpha \left[\frac{b+c}{\lambda_2} + \frac{\delta}{\lambda_2} \right] = 10 \left[\frac{0,1}{0,1} + \frac{0,015}{0,35} \right] = 10,43.$$

Максимальная температура наружной поверхности составного ограждения по формуле (9-37) равна:

$$t_{\text{макс}} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{в}}) \theta_{\text{макс}} + t_{\text{в}} = (350 - 25) \cdot 0,125 + 25 = 66^\circ\text{C},$$

где $\theta_{\text{макс}} = 0,125$ (из рис. 9-22, а) при $h/H = 0,5$; $\delta = 0,0025$ м.

Средненитегральная температура наружной поверхности составного ограждения

$$t_{\text{ср}} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{в}}) \theta_{\text{ср}} + t_{\text{в}} = (350 - 25) \cdot 0,095 + 25 = 56^\circ\text{C},$$

где $\theta_{\text{ср}} = 0,095$ (из рис. 9-22, а) при $h/H = 0,5$; $\delta = 0,0025$ м.

Потери теплоты через составное ограждение

$$q' = \alpha (t_{\text{ср}} - t_{\text{в}}) = 10 (56 - 25) = 310 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2).$$

Увеличение теплопотерь через ограждение за счет металлических ребер составит:

$$\Delta q = \frac{310 - 283}{283} \cdot 100 \approx 9,5\%.$$

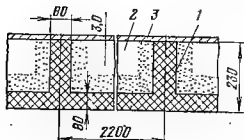


Рис. 9-30. Щитовая обмуровка.

что превышает Δq , полученное по приближенному методу расчета. Следует отметить, что расхождение в расчетах увеличивается по мере приближения теплопроводного включения к сквозному.

Пример 9-9. Щитовая обмуровка котла, состоящая из слоя шамотобетона и теплоизоляции (рис. 9-30), работает при условиях $t_{\text{вн}} = 600^\circ\text{C}$; $t_{\text{в}} =$

$= 25^\circ\text{C}$. Геометрические размеры конструкции показаны на рисунке. Теплопроводность материалов: $\lambda_1 = 0,9$ ккал/(м·ч·°C); $\lambda_2 = 0,08$ ккал/(м·ч·°C); $\lambda_3 = 40$ ккал/(м·ч·°C). Определить увеличение тепловых потерь через обмуровку за счет теплопроводных бетонных столбиков и локальный рост температуры (t_{макс}).

Решение. Тепловые потери и температуру наружной поверхности ограждения (без учета теплопроводных включений) будем искать методом последовательных приближений:

$$q = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{в}}}{\frac{h_1}{\delta_1} + \frac{h_2}{\delta_2} + \frac{h_3}{\delta_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} = \frac{600 - 25}{\frac{0,08}{0,9} + \frac{0,15}{0,08} + \frac{0,003}{40} + \frac{1}{9,5}} = 280 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2);$$

$$t_{\text{п}} = t_{\text{в}} + \frac{q}{\alpha_{\text{в}}} = 25 + \frac{280}{9,5} = 54,5^\circ\text{C}.$$

Далее определим увеличение тепловых потерь с учетом теплопроводных включений и локальный рост температуры наружной поверхности ограждения. Число Био для однородной многослойной стенки находим из выражения (9-40):

$$\text{Bi} = \alpha \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i} = 9,5 \left(\frac{0,08}{0,9} + \frac{0,15}{0,08} + \frac{0,003}{40} \right) = 18,5.$$

Максимальная наружная температура поверхности составного ограждения

$$t_{\text{макс}} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{в}}) \theta_{\text{макс}} + t_{\text{в}} = (600 - 25) \cdot 0,165 + 25 = 120^\circ\text{C},$$

где $\theta_{\text{макс}} = 0,165$ (см. рис. 9-24, б) при $h/H = 1,0$, $\text{Bi} = 18,5$.

Средненитегральная температура наружной поверхности составного ограждения

$$t_{\text{ср}} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{в}}) \theta_{\text{ср}} + t_{\text{в}} = (600 - 25) \cdot 0,075 + 25 = 68,0^\circ\text{C},$$

где $\theta_{\text{ср}} = 0,075$ (см. рис. 9-24, б) при $h/H = 1,0$, $\text{Bi} = 18,5$.

Введем поправку для средненитегральной температуры $t_{\text{ср}}$ с учетом ширины и шага включений, так как номограмма построена для ширины включения 60 мм и шага 1000 мм.

Средненитегральная температура с учетом поправки по формуле (9-39) составит:

$$t'_{\text{ср}} = \frac{\Delta \delta t_{\text{макс}} + t_{\text{ср}} \cdot 0,5 + t_{\text{в}} \Delta s}{\Delta \delta + 0,5 + \Delta s} = \frac{0,01 \cdot 120 + 68 \cdot 0,5 + 25 \cdot 0,59 \cdot 54,5}{0,01 + 0,5 + 0,59} = 61,2^\circ\text{C}.$$

Потери теплоты через составное ограждение в окружающую среду

$$q' = \alpha (t'_{\text{ср}} - t_{\text{в}}) = 9,5 (61,2 - 25) = 345 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2).$$

Увеличение потерь теплоты при наличии теплопроводных включений

$$\Delta q = \frac{q' - q}{q} = \frac{345 - 280}{280} \cdot 100 = 23\%.$$

Пример 9-10. Произвести расчет натрубной обмуровки топки, имеющей металлическое покрытие по трубам и изоляцию минераловатными плитами толщиной $\delta_1 = 2,50 - 100$ мм. Поверх минераловатных плит имеется защитная магнезиальная обкладка ($\delta_2 = 15$ мм). Трубы экрана диаметром 60 мм с шагом $s = 64$ мм оцинкованы и покрыты пластичной хромитовой массой. Давление в котле $p = 140$ кгс/см²; $t_{\text{ср}} = 335^\circ\text{C}$. Изоляция крепится к трубам при помощи металлических штырей диаметром 12 мм, расположенных равномерно с шагом 512×500 мм, по $n = 4$ шт. на 1 м² поверхности (рис. 9-19); температура окружающего воздуха $t_a = 25^\circ\text{C}$. При расчете обмуровки температуру на внутренней поверхности принять $t_1 = t_{\text{ср}} = 335^\circ\text{C}$.

Решение. Для расчета выделяем участок $F = 1$ м², на котором расположено $n = 4$ штыря. Пренебрегая площадью сечения штырей $F_1 \approx 0$, делим участок на две зоны:

$$F_2 = na^2\pi = \pi \left(\frac{2b}{\pi} \right)^2 = \frac{4 \cdot 4 \cdot 0,10^2}{\pi} = 0,051 \text{ м}^2$$

и

$$F_3 = F - F_2 = 1 - 0,051 = 0,949 \text{ м}^2,$$

где a — радиус зоны штыря (см. рис. 9-20), равный

$$a = \frac{2b}{\pi} = \frac{2 \cdot 100}{\pi} = 64 \text{ мм}.$$

Коэффициенты теплопроводности принимаем равными: для минераловатных плит $\lambda_1 = 0,1$ ккал/(м·ч·°C), для уплотнительной магнезиальной обкладки по сетке $\lambda_2 = 0,3$ ккал/(м·ч·°C).

Коэффициент теплоотдачи к воздуху $\alpha_a = 10$ ккал/(ч·м²·°C). Пренебрегая тепловым сопротивлением металлического листа ($\delta = 2 + 3$ мм), определяем термические сопротивления: для зоны со штырями по формуле (9-34)

$$R_2 = \frac{a^2}{3,2\lambda_1 b} + \frac{1}{R_{\text{шт}}} + \frac{1}{\alpha_a} = \frac{0,064^2}{3,2 \cdot 0,1 \cdot 0,1} + \frac{0,015}{0,3} + \frac{1}{10} = 0,28;$$

для зоны, свободной от штырей,

$$R_3 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_a} = \frac{0,1}{0,1} + \frac{0,015}{0,3} + \frac{1}{10} = 1,15.$$

Потери теплоты по зонам составят:

$$Q_2 = \frac{t_1 - t_a}{R_2} F_2 = \frac{335 - 25}{0,28} \cdot 0,051 = 56 \text{ ккал/ч};$$

$$Q_3 = \frac{t_1 - t_a}{R_3} F_3 = \frac{335 - 25}{1,15} \cdot 0,949 = 256 \text{ ккал/ч}.$$

Потери теплоты с 1 м² площади обмуровки

$$q = Q_2 + Q_3 = 56 + 256 = 312 \text{ ккал/(ч·м}^2\text{)}.$$

Средняя температура наружной поверхности

$$t_n = t_a + R_n q = 25 + 0,1 \cdot 312 = 56^\circ\text{C}.$$

Потери теплоты через стенку при отсутствии штырей

$$q' = \frac{t_1 - t_a}{R_3} = \frac{335 - 25}{1,15} = 270 \text{ ккал/(ч·м}^2\text{)}.$$

Увеличение потерь теплоты через стенку со штырями

$$\Delta q = \frac{312 - 270}{270} \cdot 100 = 15,5\%.$$

Пример 9-11. Подобрать и рассчитать футеровку и изоляцию стального газохода, имеющего внутренний диаметр $D_{\text{ин}} = 1000$ мм и температуру проходящих внутри газов $t_{\text{ср}} = 700^\circ\text{C}$. Температура стальной оболочки не должна по условиям прочности превышать 400°C . Температура наружного воздуха 25°C . Внутреннюю футеровку газохода выполнить в два слоя.

Решение. По условию устойчивости против износа деталей золой примем для первого слоя шамотобетон, армированный сеткой из слабелегированной проволоки. Толщина этого слоя должна быть примерно 40—50 мм; принимаем $\delta = 50$ мм. В качестве материала для второго слоя можно выбрать асбестодиаatomовый бетон, толщину которого можно определить по температуре стальной оболочки ($t_2 \leq 400^\circ\text{C}$), в которую заключена футеровка (рис. 9-31). Принимаем температуру на внутренней поверхности $t_1 = t_{\text{ср}} = 700^\circ\text{C}$.

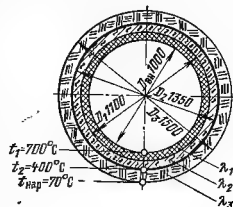


Рис. 9-31. К примеру 9-11.

Теплопроводность шамотобетонного слоя

$$\lambda_1 = 0,64 + 0,0006 t_{\text{ср}} = 0,64 + 0,0006 \cdot 700 = 1,06 \text{ ккал/(м·ч·°C)}.$$

Средняя температура слоя асбестодиаatomового бетона

$$t'_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{700 + 400}{2} = 550^\circ\text{C}.$$

Теплопроводность асбестодиаatomового слоя

$$\lambda_2 = 0,23 + 0,00011 \cdot 550 \approx 0,3 \text{ ккал/(м·ч·°C)}.$$

Зададимся предварительно наружным диаметром газохода с изоляцией $D_{\text{н}} = 1500$ мм. Потери теплоты при принятой температуре $t_{\text{н}} = 70^\circ\text{C}$ и $\alpha_{\text{н}} = 11$ ккал/(ч·м²·°C).

$$q = \alpha_{\text{н}} (t_{\text{н}} - t_a) = 11 (70 - 25) = 500 \text{ ккал/(м}^2\text{·ч)}.$$

Потери теплоты 1 м длины газохода

$$Q_1 = \pi D_{\text{н}} q = \pi \cdot 1,5 \cdot 500 \approx 2350 \text{ ккал/(ч·м)}.$$

Ввиду малости пренебрегаем термическим сопротивлением стальной оболочки.

Термическое сопротивление внутренней футеровки при известном внешнем ее диаметре D_2 по формуле (9-27) равно:

$$\sum_1 R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{D_i}{D_{вн}} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,06} \ln \frac{1,10}{1,0} +$$

$$+ \frac{1}{2\pi \cdot 0,3} \ln \frac{D_2}{1,10} = 0,0173 + 0,53 \ln \frac{D_2}{1,10}.$$

Это термическое сопротивление численно должно быть равно:

$$\sum_1 R_i = \frac{t_i - t_n}{q_i} = \frac{700 - 400}{2350} = 0,127.$$

Приравняв оба значения термического сопротивления внутренней футеровки, найдем D_2 :

$$D_2 = 0,0173 + 0,53 \ln \frac{D_2}{1,10} = 0,127; ?$$

$$\ln \frac{D_2}{1,10} = \frac{0,127 - 0,0173}{0,53} = 0,206;$$

$$\ln D_2 = 0,206 + \ln 1,10 = 0,206 + 0,0953 = 0,3013,$$

откуда

$$D_2 = e^{0,3013} \approx 1,35 \text{ м.}$$

Толщина асбестодиазотомового слоя

$$\delta_2 = \frac{D_2 - D_1}{2} = \frac{1350 - 1100}{2} = 125 \text{ мм.}$$

Термическое сопротивление внешнего слоя изоляции и футеровки в сумме должно составлять:

$$\sum_1 R_i = \frac{t_i - t_n}{q_i} = \frac{700 - 70}{2350} = 0,268.$$

Термическое сопротивление только внешней изоляции

$$R_{т2} = \sum_1 R_i - \sum_1 R_i = 0,268 - 0,127 = 0,141.$$

Принимаем, что внешняя изоляция оболочки газопровода выполнена из минеральной ваты с плотностью набивки 250 кг/м^3 . Коэффициент теплопроводности при средней температуре слоя $t_{ср} = 235^\circ\text{C}$ составит:

$$\lambda_2 = 0,052 + 0,00017 t_{ср} \approx 0,09 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Внешний диаметр изоляции D_3 найдем из равенства

$$R_{т3} = \frac{\lambda}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2} = 0,141,$$

откуда

$$\ln \frac{D_3}{D_2} = 0,141 \cdot 2\pi\lambda_2 = 0,141 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,09 = 0,0795;$$

$$\ln D_3 = 0,0795 + \ln 1,35 = 0,0795 + 0,3 = 0,38;$$

$$D_3 = e^{0,38} = 1462 \text{ мм.}$$

С учетом толщины оболочки и наружного отделочного штукатурного покрова наружный диаметр газопровода составит $D_{нар} = 1500 \text{ мм}$; это же значение было принято предварительно.

Глава десятая

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ОГРАЖДЕНИЙ

10-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Мнообразие форм теплопроводных включений в обмуровочных конструкциях затрудняет проектирование ограждений. Аналитический расчет даже простых форм включений сложен и требует больших затрат времени. Поэтому для учета влияния теплопроводных включений разработаны методы моделирования (методы аналогий), основанные на подобии физических явлений. Например, такие явления, как распространение теплоты в твердом теле, электрического тока в проводящей среде, движение вязкой жидкости, магнитного потока, хотя и различаются по физической природе, но описываются одинаковыми математическими уравнениями, что и является основой моделирования. Наиболее распространенными являются электрические и гидравлические модели. При методе электротеплоаналогий (ЭТА) применяются модели сплошных сред (электролит, фольга, электропроводящая бумага и др.), модели из электрических сеток и комбинированные модели. Наибольшее распространение из-за простоты применения нашел метод ЭТА на плоских моделях из электропроводной бумаги [10-1], хотя для сложных узлов он ограничен сортаментом электро-

проводной бумаге. Неоднородность бумаги по сопротивлению в случае ее низкого качества может приводить к искажению картины распределения теплоты в модели. Это не позволяет использовать метод ЭТА при построении расчетных номограмм для определения характерных температур наружной поверхности типовых составных узлов ограждений. Тем не менее при моделировании в большинстве случаев удается получить результаты, имеющие расхождение с аналитическими расчетами не более 5—10%, что достаточно для технических расчетов.

Более надежные и точные результаты исследований температурных полей составных узлов ограждений могут быть получены применением численных методов решения с использованием электронно-вычислительной техники. Из численных методов решения краевых задач стационарной теплопроводности наиболее широко распространены разностный метод (метод сеток). Более универсальным и эффективным методом численного решения инженерных задач с применением электронно-вычислительной техники является метод конечных элементов [10-2].

Ниже приводятся основы моделирования методом электротеплоаналогии и примеры расчета методом конечного элемента.

10-2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОГРАЖДЕНИЯХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОАНАЛОГИИ

При исследовании стационарной теплопроводности в твердых телах методом ЭТА основанием для замены температурного поля электрическим служит математическая и физическая аналогия между теплопроводностью в твердом теле и распространением электрического тока в электропроводной среде. Эквипотенциальным линиям в модели соответствуют изотермы в исследуемом твердом теле (рис. 10-1). С линиями токов они образуют ортогональную тепловую сетку, которая дает картину распределения полей температур и тепловых потоков в исследуемой конструкции. В практике широко распространены модели из электропроводящей бумаги. При построении модели должны выполняться следующие требования теории подобия:

1. Электрическая модель должна представлять узел в некотором масштабе, геометрические размеры которого

связаны коэффициентом геометрического подобия k_l :

$$k_l = \frac{l_M}{l}, \quad (10-1)$$

где l_M, l — геометрические размеры модели и природы.

2. Удельное сопротивление модели должно быть обратно пропорционально коэффициенту теплопроводности природы при постоянстве физического коэффициента подобия k_λ в любой зоне исследуемой конструкции:

$$k_\lambda = \frac{1}{\lambda \rho}, \quad (10-2)$$

где ρ — удельное поверхностное сопротивление квадрата электропроводящей бумаги, Ом*.

3. Граничные условия для модели и природы должны быть подобны, т. е. потенциалы в любой точке должны быть связаны с температурой соответствующей точки природы коэффициентом подобия теплового состояния k_t :

$$k_t = \frac{\varphi - \varphi_{\min}}{t - t_{\min}}, \quad (10-3)$$

где $\varphi, \varphi_{\min}$ — потенциал в любой точке модели и минимальный потенциал; $t, t_{\min}$ — температура в некоторой точке модели и минимальная температура.

При моделировании удобно пользоваться не значением потенциала φ , выраженного в вольтах, так как при этом нужна стабилизация питающего напряжения, а введенной единицей потенциала. В качестве приве-

* Удельное сопротивление бумаги равно среднему из сопротивлений квадрата бумаги, измеренной в двух направлениях.

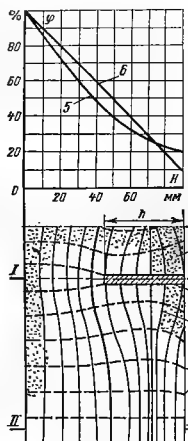


Рис. 10-1. Теплопроводность составного ограждения.

1 — изоляция; 2 — теплопроводное включение; 3 — изотермы; 4 — линия теплового потока; 5, 6 — распределение температур по толщине ограждения соответственно в сечениях I-I и II-II.

денной единицы можно принять значение, равное 1% напряжения питающего устройства. Если максимальный и минимальный уровни потенциала модели будут составлять $\varphi_{\max} = 100\%$ и $\varphi_{\min} = 0$, то выражение (10-3) примет вид:

$$k_t = \frac{100}{t_{\max} - t_{\min}}. \quad (10-4)$$

Из выражения (10-3) следует, что если принять при $\varphi_{\min} = 0$ $t_{\min} = t_0$ (где t_0 — температура среды, с которой происходит теплообмен), то электрический потенциал φ , замеренный в любой точке модели, отобразит в некотором масштабе избыточную температуру в данной точке натуры:

$$\bar{t} = \frac{\varphi}{k_t}. \quad (10-5)$$

Если учитывать, что избыточная температура представляет разность $\bar{t} = t - t_0$, искомые значения t могут быть вычислены по формуле

$$t = \frac{\varphi (t_{\max} - t_0)}{100} + t_0. \quad (10-6)$$

При моделировании тепловой работы ограждений наиболее часто встречаются следующие граничные условия: теплообмен по границе отсутствует $\frac{d\varphi}{dn} = 0$; за-

дана постоянная температура $\varphi = \text{const}$; значение температуры меняется вдоль границы $\varphi = f(S)$; задан теплообмен постоянной интенсивности со средой $q = \text{const}$; теплообмен вдоль границы имеет переменную интенсивность $q = f(S)$, где S — граница моделируемой области.

Наиболее просто реализуется граничное условие $\frac{d\varphi}{dn} = 0$. Для этого вдоль рассматриваемых участков обрезают электропроводную бумагу и преграждают путь току в направлении нормали к данной границе. Для реализации граничного слоя $\varphi = \text{const}$ на заданном участке необходимо приклеить шины из фольги и подать на них напряжение с нужным потенциалом. На участках границы, где потенциал φ является функцией длины границы S , вдоль границы области приклеивается полоска фольги, разрезанная по длине S на n участков, внутри

каждого из которых потенциал будет оставаться постоянным. Подключая выход декад делителя напряжений к соответствующим участкам, можно добиться требуемого распределения φ по границе. Граничное условие теплообмена $q = \text{const}$ выполняется просто. Термическое сопротивление перехода теплоты от поверхности к среде с температурой t_0 моделируется полосой электропроводной бумаги, ширина которой δ при заданном коэффициенте теплоотдачи от стенки к среде α_t определяется по формуле

$$\delta = \frac{k_t}{\alpha_t \rho_t}. \quad (10-7)$$

где ρ_t — удельное сопротивление бумаги.

В тех случаях, когда задан радиационный теплообмен в топочной камере, например, при моделировании тепловой работы ошитоанного экрана, он может быть условно сведен к конвективному теплообмену с использованием формулы Ньютона:

$$q = \alpha_t (t_\phi - t), \quad (10-8)$$

где t_ϕ — заданная температура факела; t — замеряемая температура поверхности.

Значение α_t неизвестно, и его подбирают методом последовательных приближений путем сравнения значений теплового потока, рассчитанных по формуле (10-8) и по уравнению Стефана — Больцмана.

Граничное условие $q = f(S)$ встречается редко, например, в задачах по лучистому теплообмену, где распределение теплового потока от факела по периметру трубы определяется угловым коэффициентом освещенности. Изложение более сложного способа реализации подобного граничного условия дано в [10-1] и здесь не приводится.

Конструктивно модель представляет собой плоское сечение исследуемой обмуровочной конструкции, выполненной из электропроводной бумаги с различным удель-

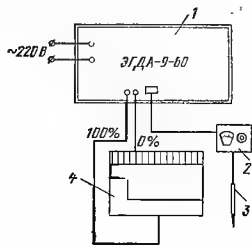


Рис. 10-2. Принципиальная схема моделирования методом ЭТА.

ным сопротивлением. Отдельные участки модели склеиваются на ширине 2—3 мм между собой электропроводным клеем.

Принципиальная схема моделирования методом ЭТА с помощью электронного интегратора ЭГДА-9-60 показана на рис. 10-2. Интегратор 1 представляет собой измерительный мост постоянного тока с выпрямителем для питания

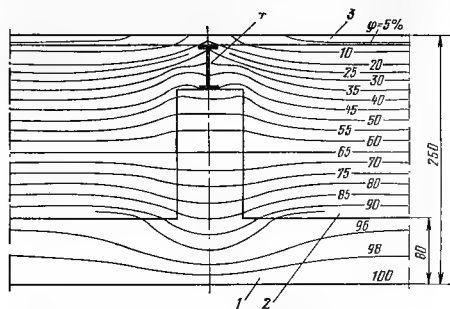


Рис. 10-3. Моделирование температурных полей составного узла ограждения.

1 — жаростойкий бетон; 2 — изоляция; 3 — газоплотная штукатурка; 4 — каркасная рема плиты.

от сети переменного тока. В схему интегратора входит необходимый для моделирования потенциометрический делитель напряжения. Измерительное устройство 2 выполнено в виде отдельного малогабаритного блока. С помощью шупа 3 измерительного устройства производится снятие промежуточного значения потенциала в заданной точке модели 4.

Для представления процесса моделирования рассмотрим конструкцию обмуровки (рис. 10-3), состоящую из слоев жаростойкого бетона 1 сложной конфигурации, изоляции 2 и наружной газоплотной штукатурки 3. Рама цита обмуровки 4 находится в слое изоляции. Условия работы обмуровки и теплофизические характеристики следующие: температура на внутренней поверхности $t_{вн}=650^\circ\text{C}$; окружающего воздуха $t_a=25^\circ\text{C}$; коэффициент теплоотдачи от обмуровки к воздуху $\alpha=10 \text{ ккал}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$; коэффициент теплопроводности материалов: металла $\lambda_1=40$, изоляции $\lambda_2=0,1$, бетона $\lambda_3=0,9$ и

штукатурки $\lambda_4=0,5 \text{ ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$. Геометрические характеристики узла обмуровки показаны на рис. 10-3.

Требуется найти распределение температуры по сечению конструкции, наружную температуру обмуровки и тепловые потери в окружающую среду с учетом теплопроводных включений. Предварительно найдем величину q , произведя расчет данного узла обмуровки без учета теплопроводного включения:

$$q = \frac{t_{вн} - t_a}{\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha}} = \frac{650 - 25}{\frac{0,26}{0,1} + \frac{0,1}{0,9} + \frac{0,015}{0,15} + \frac{1}{10}} = 220 \text{ ккал}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2).$$

Зная тепловой поток через обмуровку q , определяем температуру наружной поверхности обмуровки t_n :

$$t_n = t_a + \frac{1}{\alpha} q = 25 + 22 = 47^\circ\text{C}.$$

Для моделирования тепловой работы конструкции с учетом тепловых «мостов» берем участок, ограниченный вертикальными осями симметрии, условно пересекать стенку швеллера рамы по центру его полки. В данном случае поле температур двумерное, т. е. $t=f(x, y)$. Граничные условия задачи: теплообмен по вертикальным осям симметрии отсутствует, постоянство температуры по внутренней поверхности и конвективный теплообмен по наружной поверхности. Так как погрешность измерений уменьшается при увеличении масштаба модели, считается, что площадь модели должна быть не менее 200 см^2 . В нашем случае конструкция имеет небольшие размеры и можно взять масштаб $m=1/1$. При этом масштабный коэффициент k_λ , вычисленный по формуле (10-1), будет равен единице. Далее подбираем бумагу для изготовления модели. Так как теплопроводность материала и электропроводность бумаги обратно пропорциональны, выбираем для изоляции с $\lambda_2=0,1 \text{ ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C})$ бумагу с максимальной электропроводностью (в нашем случае $\rho_2=100 \text{ кОм}$). Коэффициент подобия для всей модели, вычисленный по формуле (10-2), составляет:

$$k_\lambda = \frac{1}{0,1 \cdot 100 \cdot 000} = 10^{-4} \text{ ч}\cdot\text{м}\cdot^\circ\text{C}/(\text{ккал}\cdot\text{Ом}).$$

Из этой же формулы, учитывая постоянство k_λ для всей модели, находим значение ρ для остальных зон модели:

$$\rho_1 = \frac{1}{k_\lambda \lambda_1} = \frac{1}{10^{-4} \cdot 40} = 250 \text{ Ом} = 0,25 \text{ кОм};$$

$$\rho_3 = 10 \text{ кОм} \text{ и } \rho_4 = 20 \text{ кОм}.$$

Коэффициент теплоотдачи моделируем полосой электропроводной бумаги. Ширина полосы при принятом $\rho=12,5 \text{ кОм}$ вычисляется по формуле (10-7):

$$\delta = \frac{k_l}{k_\lambda \alpha \rho} = \frac{1}{10^{-4} \cdot 10 \cdot 12,5 \cdot 10^3} = 0,08 \text{ м}.$$

Обычно моделирование α производится полосой из бумаги, одинаковой с бумагой для модели, что позволяет избежать лишней склейки. В данном случае это привело бы к слишком узкой полоске и могло бы вызвать большую погрешность.

Для моделирования отвода теплоты перпендикулярно поверхности полоса для α разрезается в поперечном направлении на полоски шириной 5–10 мм. Для предотвращения электрического контакта между ними в прорез вкладывается лист обычной бумаги. Детали модели вырезаются в масштабе 1:1 с необходимым припуском на

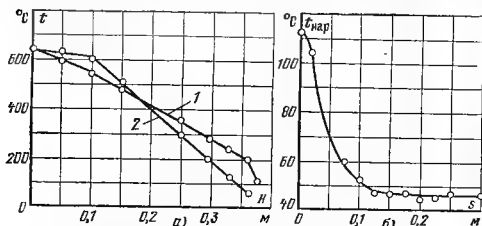


Рис. 10-4. Распределение температур в модели.

α — по толщине ограждения; β — по наружной поверхности ограждения; 1 — по оси включения; 2 — на участке максимального удаления от включения.

склейку. При изготовлении модели у выбранной бумаги проверяется ее удельное сопротивление. Так как оно неоднородно возле краев рулона, при изготовлении модели целесообразно отступать от края примерно на 100–150 мм с каждой стороны. Места склейки модели разглаживаются и прижимаются грузом. Фольга перед приклеиванием к бумаге обезжиривается спиртом. Полное высыхание клея происходит через 5–7 ч. После изготовления модель зажимают в шины и к внутренней поверхности ограждения подводят электрический ток с потенциалом, равным 100%, что соответствует температуре ограждения 650°C, и к полосе, моделирующей α с нулевым потенциалом, что соответствует температуре воздуха $t_0 = 25^\circ\text{C}$. Установив плгу интегратора (шуп) в любую точку модели, с помощью измерительного устройства получаем значение потенциала. Распределение эквипотенциальных линий (изотерм) в модели с учетом теплопроводного включения показано на рис. 10-3. На рис. 10-4 показано распределение температур по наружной поверхности, по толщине конструкции в районе теплопроводного включения и на участке максимального удаления от него. Пересчет замеренных значений потенциалов в температуру ведется по формуле (10-6). Например, максимальное значение потенциала, замеренное на наружной поверхности модели по оси теплопроводного включения, составляет $\varphi = 13,9$ В, что в пересчете по упомянутой формуле дает:

$$t = \frac{\varphi(t_{\text{вн}} - t_0)}{100} + t_0 = \frac{13,9(650 - 25)}{100} + 25 = 112^\circ\text{C}.$$

Средняя температура наружной поверхности обмуровки с учетом влияния теплопроводного включения (рис. 10-4, б) составляет $t_{\text{ср}} = 63^\circ\text{C}$.

Потеря теплоты в окружающую среду с учетом тепловых «мостов» составит:

$$q_1 - \alpha(t_{\text{ср}} - t_n) = 10(53 - 25) = 280 \text{ ккал/(ч·м}^2\text{)}.$$

Превышение потерь теплоты по сравнению с плоской однородной стенкой составляет:

$$\Delta q = \frac{q_1 - q}{q} \cdot 100 = \frac{280 - 220}{220} \cdot 100 = 27\%.$$

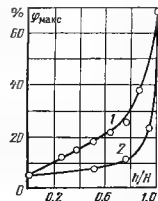


Рис. 10-5. Характер влияния относительной глубины включения h/H на $t_{\text{макс}}$ обмуровочной конструкции ($s = 0,5$ мм; $\delta = 0,0025$ м; $B_2 = 15$; $\lambda_1/\lambda_2 = 390$).

Приведенный пример показывает простоту метода моделирования, его преимущество над сложными аналитическими расчетами.

На ZnO были проведены исследования температурных полей методом ЭТА [10-3] по методике, разработанной ОРГРЭС. В программу исследований входило изучение влияния теплопроводных включений прямоугольной формы на распределение температур по наружной поверхности составной обмуровочной конструкции. Результаты исследований показали, что максимальная температура на наружной поверхности обмуровки $t_{\text{макс}}$ практически не зависит от шага включений. Для несквозного включения из металла максимальная температура наружной поверхности обмуровки зависит не только от глубины включения, но и от его местоположения. При расположении включения с наружной стороны изоляции (например, открытые наружной швеллерной рамы в слое изоляции) рост локальных температур изоляции вблизи включения более интенсивен. Зависимость $t_{\text{макс}}$ от местоположения включения показана на рис. 10-5. Кривая 1 — включение расположено с наружной стороны ограждения, кривая 2 — с внутренней.

10-3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СОСТАВНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На ЗиО разработана программа для инженерных расчетов на ЭВМ плоских и осесимметричных стационарных температурных полей для областей произвольной формы с использованием метода конечных элементов. В разработанной программе расчетная область может иметь произвольную форму и состоять из нескольких участков с различной теплопроводностью. Граничные условия могут быть переменными вдоль границ и задаваться или коэффициентами теплоотдачи конвекцией α и постоянной температурой среды t_0 , или плотностью теплового потока q по нормали к границе, или температурой границы t . Внутри области может быть задана дискретная плотность тепловыделения Q по группе элементов. Программа позволяет считать несколько вариантов краевых условий для заданной расчетной области и написана на языке ФОРТРАН для цифровой ЭВМ «Минск-32». Расчетная область разбивается на треугольные элементы с записью их координат. В области ожидаемого интегративного изменения температуры размеры элементов должны быть минимальными. Машина рассчитывает поле температур в узлах заданных элементов расчетной области. Исходные данные готовятся на перфокартах; результаты расчета автоматически печатаются в виде таблиц на типовых страницах и могут записываться на магнитную ленту для дальнейшего использования в расчетах температурных напряжений.

Объем и порядок по составлению исходных данных при расчете стационарных температурных полей составных узлов произвольной формы по программе ЗиО приведены в [10-4].

На рис. 10-6 показаны изотермы в ошпорованном экране без набивки (а), с малотеплопроводной (б) и с высокотеплопроводной (в) набивками, построенные по расчету при помощи метода конечных элементов по программе ЗиО. Избыточные температуры (превышение над температурой рабочей среды) вершины шипа $\Delta t_{ш}$ по его оси, вершины шипа $\Delta t_{ш}^*$ по его образующей, температуры металла трубы под шипом по оси шипа $\Delta t_{тр}$, то же по образующей шипа $\Delta t_{тр}^*$, температуры металла наружной поверхности трубы между шипами $\Delta t_{тр}^*$, а так-

же температуры наружной поверхности набивки между шипами Δt_n приведены в табл. 10-1.

Подобные расчеты ошпорованных экранов выполнены для различных схем шипования и материалов набивок.

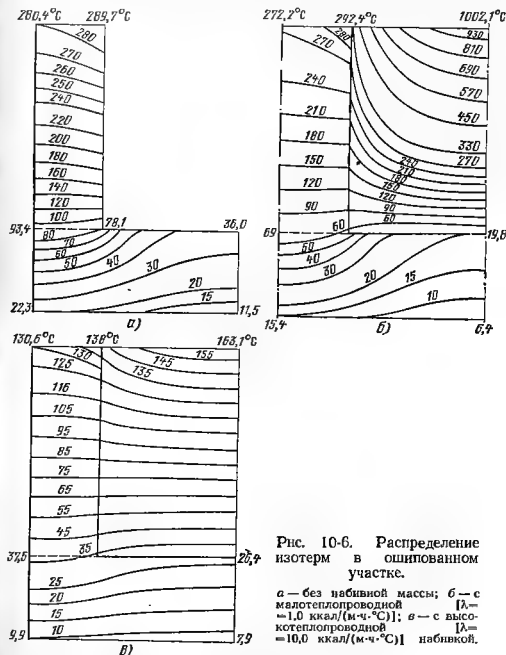


Рис. 10-6. Распределение изотерм в ошпорованном участке.

Их результаты представлены в виде графических зависимостей на рис. 8-7 — 8-9 и могут быть использованы при проектировании для оценки тепловой работы таких экранов.

Таблица 10-2

Варианты накаркасной обмуровки котла

№ варианта	Конструкция узола	Температура в точках, °С				Средняя температура поверхности обмуровки, °С	Температура наружной поверхности обмуровки, °С	Отношение к теплопотерям котла, %
		a	б	в	г			
1		65	82	80	56	64,4 58,7	394 337	>40,7 >20,3
2		66,5	82	117	53	61,0 57,0	360 320	>28,6 >14,2
3		37	42	44	53	49,8 51,4	248 254	<11,5 <5,7
4		31	34	48	53	51,4 52,2	264 272	<5,7 <2,9
5		112	158	172	50,7	67,7 56,6	427 316	>108,7 >54,1
6		183	251	258	45,5	61,9 53,7	369 287	>80,0 >40,0
7		55	66	105	45,5	47,6 46,7	226 217	>10,2 >5,8
8		76	97	129	45,5	47,1 46,5	221 215	>7,8 >4,9

Примечание. Дробью указано: в числителе — значения величин t , q , Δq при шаге включений 600 мм, в знаменателе — при шаге 1200 мм.

1—4, но при укрытии швеллерной рамы слоем изоляции. Для большей ясности исследуемых вариантов обмуровки их схемы приведены в сводной табл. 10-2, где утолщенной сплошной линией по наружной поверхности ограждения обозначена конструкция с наружной металлической обшивкой, а пунктиром — без нее. Распределение температур по узлам обмуровки определено мето-

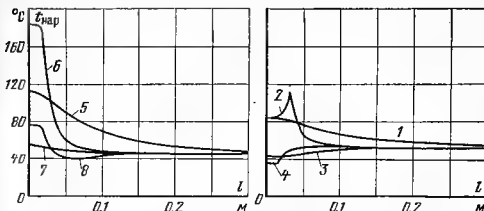


Рис. 10-9. Распределение температур по наружной поверхности исследуемой обмуровки.

1, 2, 3, ..., 8 — варианты конструкции ограждения в соответствии в табл. 10-2.

дом конечных элементов. При расчете приняты следующие средние значения коэффициентов теплопроводности материалов, ккал/(м·ч·°С): изоляции 0,086; шамотобетона и газоплотной штукатурки 1,0; металла 39 и следующие условия работы ограждения: температура внутренней поверхности 600°С; коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху 10 ккал/(ч·м²·°С); температура окружающего воздуха 25°С.

Результаты расчетов представлены в табл. 10-2.

На рис. 10-9 показано распределение температур по наружной поверхности ограждений.

Анализ результатов расчета (см. табл. 10-2) тепловой работы ограждения в зависимости от его конструктивного оформления показывает, что в обмуровке с теплопроводным включением (шамотная стенка) наблюдается локальное повышение температур в районе включения. При наличии наружной металлической обшивки максимальная температура наружной поверхности ограждения снижается за счет растечки теплоты до 80°С. Потери теплоты в окружающую среду через конструк-

ция с металлической обшивкой выше, чем потерн через ограждение без обшивки.

Аналогичная картина, но более четко наблюдается при сравнении конструкций по вариантам 5 и 6. В обмуровках без шамотных стенок характер распределения температур по наружной поверхности ограждения несколько иной. Швеллерная рама в конструкциях 3, 4 играет роль наружных охлаждающих ребер и при отсутствии шамотной стенки, несколько снижает температуру наружной поверхности, что приводит к снижению потерь теплоты в окружающую среду. В конструкциях по вариантам 7, 8 также отсутствуют шамотные стенки, однако укрытие рамы из швеллеров слоем изоляции приводит к росту температуры по наружной поверхности ограждения в районе включения и к повышению тепловых потерь в окружающую среду.

При эксплуатации котлов для обеспечения чистоты наружной поверхности ограждения, особенно при сжигании угольной пыли, часто ставится вопрос о выравнивании наружной поверхности обмуровки за счет переноса металлической обшивки на верхнюю полку швеллера с укрытием его слоем изоляции. Для этого интересно сопоставить тепловую работу обмуровок, выполненных по вариантам 3 и 7. Последняя получается из конструкции 3 за счет дополнительного слоя изоляции до верхней полки швеллерной рамы, что увеличивает объем изоляции на 40%. Действительно, если рассматривать только плоскую стенку (без учета швеллерной рамы), то потери теплоты в конструкции по варианту 7 составят $210 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$, что на $70 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ меньше, чем у конструкции 3. Однако укрытие швеллерной рамы с шагом 600 мм в слой изоляции меняет картину температурных полей в ограждении. В этом случае тепловые потерн составляют, $\text{ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$: в конструкции 3 217, в конструкции 7 226, т. е., несмотря на перерасход изоляционного материала, улучшить теплозащитные характеристики ограждения не удастся, а потери теплоты возрастает примерно на 4,0%.

Приведенные примеры показывают, что представление о тепловой работе ограждений не всегда соответствуют действительности. Это указывает на целесообразность при проектировании ограждений проведения расчетной или экспериментальной проверки нового конструктивного решения.

Глава одиннадцатая

ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОБМУРОВОК

Полный механический расчет ограждений современных энергетических котлов связан с расчетами несущего каркаса для накаркасных обмуровок и трубной системы под давлением для натрубных обмуровок. Отдельно рассчитывается каркас с учетом воздействий на него обмуровки и давления газов, с учетом сейсмических сил и цельносварные газоходы с мембранными стенами [9-2]. Ниже приведены только основы механического расчета отдельных узлов и элементов, непосредственно связанных с обмуровкой, необходимые для правильного конструирования различных обмуровок.

В гл. 1 было показано различие в передаче нагрузок на каркас для натрубных и накаркасных обмуровок. На обмуровку действуют температурные и сейсмические усилия, собственная масса и давление газов. К постоянно действующим относятся температурные усилия, собственная масса и давление газов при работе котлов под наддувом. К периодически действующим усилиям относятся давление газов, возникающее при хлопках в топочной камере и газоходах, и сейсмические силы, возникающие от ускорений при колебаниях всей установки.

11-1. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПИВЫ

При нагревании обмуровки и разности температур по ее толщине возникают деформации и связанные с ними (в основном скалывающие) напряжения. Эти напряжения приводят к разрушению как отдельных кирпичей, так и целых участков обмуровки. Разрушению прежде всего подвергается футеровка — слой обмуровки из шамотных кирпичей или бетона. Кирпичная футеровка прочнее, чем бетонная, из-за наличия швов, заполненных раствором и дающих усадку; это позволяет ей расширяться, благодаря чему напряжения в отдельных кирпичах меньше, чем в сплошной бетонной футеровке.

Обмуровка должна быть сконструирована и выполнена таким образом, чтобы в ней не возникало разрушающих напряжений и исключалась передача темпера-

турных усилий на металлический каркас котла. Элементы каркаса рассчитываются только на нагрузки, связанные с массой обмуровки и давлением газов в газоходах.

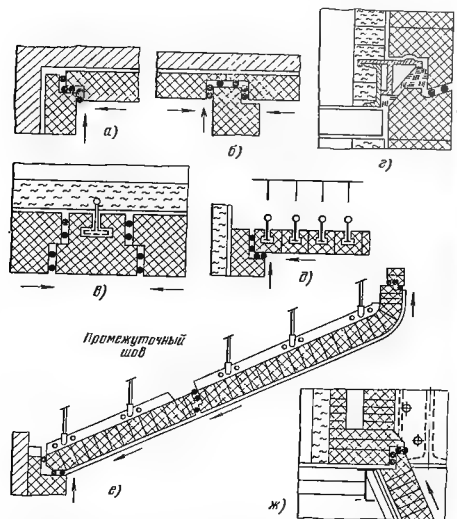


Рис. 11-1. Температурные швы в обмуровке.

а — угловой шов; б, в — промежуточные швы; г — разгрузочный шов на вертикальной стене; д — шов по периметру потолка; е — швы в наклонном перекрытии; ж — шов у холодной воронки (стрелками указаны направления расширения элементов обмуровки).

Очевидно, что чем на большее число участков разделена футеровка, чем она тоньше и теплопроводнее, тем меньше она должна разрушаться. Поэтому в бетонных футеровках обязательно устраивают температурные швы, позволяющие отдельным участкам свободно расширяться. Уменьшение толщины бетонной футеровки

ограничивается технологическими факторами (расположение арматуры, крупность фракций заполнителя и др.), поэтому толщина слоя бетона составляет не менее 50—60 мм. Размеры температурных швов выбираются в зависимости от линейного расширения и усадки материала футеровки. Температурные швы выполняются на глубину футеровки, которая по сравнению с термозащитными материалами (диатомовым кирпичом, термоизоляционным бетоном и изоляционными плитами) не обладает необходимой податливостью.

Расширение кирпичной кладки и шамотобетонной футеровки необратимо. Футеровка расширяется не полностью, на значение, обусловленное коэффициентом линейного расширения ее материала, а на меньшее за счет усадки при нагревании материала раствора в кирпичной кладке и шамотобетона в массиве.

Расчет размеров щелей обычно ведут при условной температуре футеровки, равной 1000—1200°C, исходя из следующих значений усадк и линейного расширения материала футеровки:

Материал футеровки	Линейное расширение, %	Усадка, %
Шамот (в интервале от 300 до 1200°C)	0,7	0,3
Шамотобетон на портландцементе (в интервале от 300 до 1200°C)	0,75	0,4—0,8
Шамотобетон на глиноземистом цементе (в интервале от 300 до 1000°C)	0,55—0,6	0,4—0,8

Из приведенных данных следует, что расчетные расширения для температурных швов футеровки должны составлять: для кирпичной $\Delta_k = 0,7 - 0,3 = 0,4\%$, или 4 мм/м длины стенки; для бетонной $\Delta_b = 0,75 - 0,4 = 0,35\%$, или 3,5 мм/м длины стенки.

В кирпичных и бетонных футеровках температурные швы устраивают во всех местах, где происходят температурные расширения. К ним относятся углы топок и газоходов, места сопряжений потолочных перекрытий с вертикальными стенами, горизонтальные разгрузочные пояса и т. п. (рис. 11-1).

В кирпичной кладке температурный шов обычно выполняется многоступенчатым с размером каждой ступени $1/2$ кирпича. В наружные и внутренние щели закладывают по два асбестовых шнура, поскольку асбест сохраняет свои свойства при температуре до 500°C, поэтому из щели с огневой стороны шнур высыпается,

а в последующих щелях, имеющих меньшую температуру, уплотняющие свойства шнура сохраняются. Расчет размеров щелей ведут так, чтобы при их уплотнении асбестовый шнур сжимался не более чем на $\frac{2}{3}$ своего начального диаметра. Например, для топочной камеры с размерами 8×6 м расширение кладки на каждую стену длиной 8 м составляет $\Delta = 0,4 \cdot 10^{-2} \cdot 8 \cdot 10^3 = 32$ мм, или на каждую сторону стены $\Delta/2 = 16$ мм.

Обозначив ширину щели температурного шва через b , мм, а диаметр шнура через d , мм, найдем эти размеры из следующих двух равенств:

$$b = d - 2 \text{ и } b = \frac{1}{3} d + \frac{1}{2} \Delta,$$

откуда

$$d = 0,75\Delta + 3.$$

Для рассматриваемого примера $d = 0,75 \cdot 32 + 3 = 27$ мм; $b = 27 - 2 = 25$ мм, где 2 мм — превышение диаметра асбестового шнура над шириной щели, необходимая для ее уплотнения.

В шамотобетонной футеровке при сопряжении стен в углах и с потолочными перекрытиями температурные швы выполняются шириной не менее 20 мм. Для снятия внутренних температурных напряжений в бетоне в футеровке из щитов должны быть температурные швы в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Шамотобетонная футеровка щитов разрезается на прямоугольные карты с размерами по ширине и высоте не более 0,7—1,0 м. Швы делают на всю глубину футеровки путем закладки в бетон фанерных или стальных полос. После затвердевания бетона стальные полосы извлекают, а фанерные оставляют в футеровке. Впоследствии они выгорают. Ширина получаемых швов составляет 4—5 мм и, как показала практика, достаточно для предотвращения разрушения футеровки от температурных напряжений.

В натрубных обмуровках с жаростойким армированным сеткой слоем, наносимым с тыльной стороны экранных труб, температурные швы излишни. Тонкий жаростойкий слой, укрепленный на трубах, расширяется вместе с ними при нагревании, а так как коэффициент линейного расширения слоя меньше, чем у труб, слой по-

крывается многочисленными трещинами, которые уплотняются последующей многослойной изоляцией и образуют по сетке спаружу ограждения.

11-2. УСИЛИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ И РАСЧЕТ ОБШИВКИ

У накаркасных обмуровок передача усилий от давления газов на каркас происходит через щиты, укрепленные на его несущих элементах. В свою очередь на щиты усилия передаются через подверженную давлению газов и закрепленную на них обмуровку.

У натрубных обмуровок усилия от давления газов воспринимаются укрепленными на экранных трубах поясными балками. Щиты, поясные балки и стальная обшивка входят в конструкцию ограждения котла, поэтому их расчет ведется независимо от расчета основного несущего каркаса.

При проектировании обмуровок, имеющих стальную обшивку, принято считать, что давление газов непосредственно действует на нее, а затем передается на элементы, к которым она прикреплена. Обмуровку, на которую передается давление газов при «хлопках» в газоходах котлов, работающих под разрежением, обычно не рассчитывают. Многолетний опыт эксплуатации кирпичных и щитовых обмуровок показал, что кирпичная кладка и армированные слои шамотного и термоизоляционного бетона при воздействии на них усилий из-за возможного повышения давления в газоходах достаточно прочны и не разрушаются, если они поддерживаются металлоконструкциями щитов и каркаса. В котлах, работающих с наддувом, избыточное давление газов передается непосредственно на стальную обшивку по трубам или на мембранные панели из экранных труб. Новые энергетические котлы с натрубной и щитовой обмуровками, работающие под разрежением, для плотности ограждения поставляются со стальной обшивкой.

По правилам взрывобезопасности установок для приготовления и сжигания топлива в пылевидном состоянии каркас топки и газоходов проектируемых котлов должен быть рассчитан на давление: 1) для установок, работающих под разрежением, — на внутреннее, превышающее атмосферное на 300 кгс/м^2 ; 2) для установок, работающих под наддувом, — на внутреннее, превышающее рабочее на 300 кгс/м^2 .

Наиболее часто встречаются обшивки трех типов. В показанной на рис. 11-2 схеме обшивки с металлическими щитами для накаркасных обмуровок стальные листы непосредственно привариваются к стойкам и балкам каркаса. Расстояние между стойками составляет $l=1,0\div 1,5$ м. В некоторых конструкциях листы обшивки не разрезаются на прямоугольные участки, а приварива-

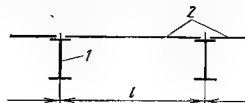


Рис. 11-2. Обшивка по металлическим конструкциям обмуровки.

1 — металлоконструкция щита; 2 — листы обшивки.

ются целиком, но не с внутренней, а с наружной стороны обмуровки к полкам стоек и балок.

Металлическая обшивка для наружной обмуровки (рис. 11-3) состоит из листов толщиной 2—3 мм с отбортовкой. Планки являются несущими элементами для обшивки и обмуровки. Листы обвариваются по гребню отбортовки и вокруг планок, а на них укрепляется изоляция. Ширина листов кратна шагу экранных труб и принимается в пределах 0,5—0,7 м.

В обшивке по трубам из цельных плоских листов (рис. 11-4) в них делаются отверстия, через которые проходят круглые штыри, приваренные к трубам и являющиеся несущими элементами. Отверстия в листах закрываются шайбами, обвариваемыми по периметру и вокруг штырей. Соединения отдельных участков листов производятся сваркой внахлестку. Расстояние между штырями для креплений не должно превосходить $0,6 \times \times 0,6$ м.

Прочность штырей и сварных швов обычно не рассчитывают, так как при их диаметре 10—12 мм и размещении по указанному шагу обеспечивается с большим запасом необходимая прочность.

Расчет на прочность листов обшивки производится так же, как расчет гибких мембран. (Мембраной называется такая тонкая пластина, в которой напряжения можно считать равномерно распределенными по ее толщине.) Так как мембрана обладает большой гибкостью, то она не воспринимает изгибающих и скручивающих моментов и рассчитывается только на растягивающие усилия, дей-

ствующие по всему сечению. Поперечная нагрузка воспринимается в срединной плоскости. Гибкой мембраной принято считать такие пластины, прогиб которых значительно превышает половину ее толщины. Формулы, по которым рассчитываются толщина, прогиб и напряжения гибких мембран, довольно сложны. В настоящей работе предлагаются приближенные методы, которые дают

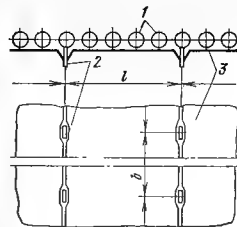


Рис. 11-3. Обшивка по трубам с отбортовкой листов.

1 — экранные трубы; 2 — планки, приваренные к трубам для крепления обшивки и изоляции; 3 — отбортованные листы обшивки.

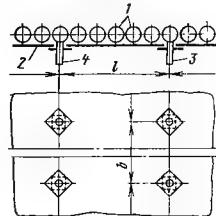


Рис. 11-4. Обшивка по трубам.

1 — экранные трубы; 2 — листы обшивки с отверстиями; 3 — штыри для крепления листов и изоляции; 4 — шайбы для уплотнения и крепления листов.

результаты, мало отличающиеся от точных, но значительно проще этих последних. В основе этих методов лежит предположение, что после прогиба мембрана становится сферической или цилиндрической в зависимости от схемы ее закрепления. На основе этих предпосылок получены и рекомендуются следующие формулы [9-1].

Для расчета мембран, опертых на две стороны (рис. 11-5):

напряжение

$$\sigma_k = \frac{aq}{\alpha \delta}; \quad (11-1)$$

угол

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{6(1-\mu^2)aq}{E\delta}}. \quad (11-2)$$

Для мембран, установленных на штырях (рис. 11-6):
напряжение

$$\sigma_k = \frac{qa}{2\delta\alpha}; \quad (11-3)$$

угол

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{3qa(1-\mu)}{E\delta}}. \quad (11-4)$$

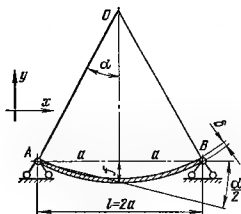


Рис. 11-5.

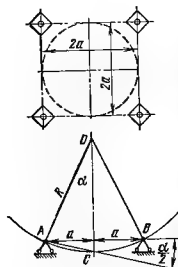


Рис. 11-6.

Прогиб для обоих случаев закрепления

$$f = \frac{a\alpha}{2}. \quad (11-5)$$

Здесь q — равномерно распределенная нагрузка от давления на обшивку, кгс/см²; E — модуль упругости материала обшивки, кгс/см²; μ — коэффициент Пуассона, равный 0,3.

Пример 11-1. Произвести поверочный расчет стальной обшивки накаркасной обмуровки (см. рис. 11-2). Толщина листов $\delta=3$ мм. Наибольшее расстояние между стойками $l=2a=1500$ мм. Расчетное давление газов 300 кгс/м²; температура поверхности обшивки не более 55—60°C.

Решение. Принимаем: модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^6$ кгс/см²; коэффициент Пуассона для стали $\mu=0,3$; допускаемое напряжение на растяжение 1600 кгс/см²; допускаемое напряжение на срез $0,6 \times 1600=960$ кгс/см²; равномерно распределенная нагрузка $q=300/10^4=0,03$ кгс/см². По формуле (11-2) проверим, является ли обшивка гибкой мембраной:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{6(1-\mu^2)aq}{E\delta}} = \sqrt[3]{\frac{6(1-0,3^2) \cdot 75 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,3}} = 2,60 \cdot 10^{-2} \text{ рад.}$$

Тогда прогиб по формуле (11-5) составит:

$$f = \frac{a\alpha}{2} = \frac{76 \cdot 2,60 \cdot 10^{-2}}{2} = 0,96 \text{ см} = 9,6 \text{ мм.}$$

Условие $f > \delta/2$ соблюдается — мембрана гибкая. Напряжение в обшивке по формуле (11-1) равно:

$$\sigma_k = \frac{aq}{\alpha\delta} = \frac{75 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{2,60 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3} = 290 \text{ кгс/см}^2.$$

Напряжение очень небольшое, прогиб составляет всего около 1/150.

Усилие, передающееся на швы сварки; на 1 см длины шва

$$p = \sigma_k \delta = 290 \cdot 0,3 = 87,0 \text{ кгс/см.}$$

Напряжение в сварных швах (катет шва равен 0,78)

$$\tau_{св} = \frac{p}{0,78} = \frac{87,0}{0,7 \cdot 0,3} = 415 \text{ кгс/см}^2,$$

что значительно ниже допускаемого.

Пример 11-2. Произвести поверочный расчет стальной обшивки по трубам для натрубной обмуровки, укрепленной на штырях (см. рис. 11-4). Толщина листов $\delta=2$ мм. Расстояние между штырями $2a \cdot 2a=500 \cdot 500$ мм. Расчетное давление газов (наддув 300 кгс/м² плюс избыток 200 кгс/м²) составляет 500 кгс/м². Температура листа обшивки 400°C.

Решение. Принимаем: модуль упругости для углеродистой стали при 400°C $E=1,67 \cdot 10^6$ кгс/см²; коэффициент Пуассона $\mu=0,3$; допускаемое напряжение на растяжение при 400°C 700 кгс/см²; равномерно распределенная нагрузка $q=500/10^4=5 \cdot 10^{-2}$ кгс/см².

Проверяем по формуле (11-4), является ли мембрана гибкой:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{3qa(1-\mu)}{E\delta}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{1,67 \cdot 10^6 \cdot 0,2}} = 1,98 \cdot 10^{-2} \text{ рад.}$$

Прогиб по формуле (11-5) составляет:

$$f = \frac{a\alpha}{2} = \frac{25 \cdot 1,98 \cdot 10^{-2}}{2} = 0,25 \text{ см} = 2,5 \text{ мм} > \frac{\delta}{2}.$$

Напряжение в мембране по формуле (11-3) равно:

$$\sigma_k = \frac{qa}{2a\delta} = \frac{25 \cdot 5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1,98 \cdot 10^{-2} \cdot 0,2} = 158 \text{ кгс/см}^2.$$

Расчет показывает, что стальная обшивка на штырях испытывает небольшие напряжения и имеет небольшой прогиб — около 1/200, что очень важно для наружной изоляции из теплоизоляционных плит.

11-3. РАСЧЕТ ОПОРНЫХ КРОНШТЕЙНОВ И ИХ КРЕПЛЕНИЙ

Из схемы установки опорного кронштейна и его крепления (рис. 11-7) видно, что кронштейн нагружен массой кирпичной обмуровки, высота которой в пределах одного

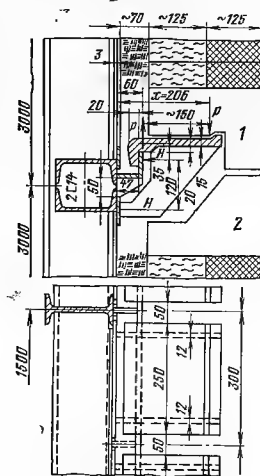


Рис. 11-7. Установка разгрузочно-го кронштейна.
1, 2 — фасонные кирпичи.

Шамстан кладка: плотность $g_1 = 3,0 \cdot 0,125 \cdot 1,900 = 712 \text{ кг/м}$; координата центра тяжести $x_1 = 70 + 125 + 125/2 = 257 \text{ мм}$, где 70 и 125 — соответственно толщины слоя совелитовой изоляции, дятлового и шамстанного кирпичей.

Диатомовая кладка: плотность $g_2 = 3,0 \cdot 0,125 \cdot 1 \cdot 600 = 225$ кг/м;
координата центра тяжести $x_2 = 70 + 125/2 = 133$ мм.

Совелитовая изоляция: плотность $\rho_3 = 3,0 \cdot 0,07 \cdot 1 \cdot 400 = 84$ кг/м;
координата центра тяжести $x_3 = 70/2 = 35$ мм.

Линейная плотность обмуровки

$$Q = 712 + 225 + 84 = 1021 \text{ кг/м.}$$

Координата центра тяжести

$$\bar{x} = \frac{\sum gx}{\sum g} = \frac{712 \cdot 25,7 + 225 \cdot 13,3 + 84 \cdot 3,5}{1021} = 21,02 \text{ cm.}$$

Нагрузка, приходящаяся на один крошфейн при шаге между шинами 300 мм.

$$p' = 0,30Q = 0,30 \cdot 1021 \approx 306 \text{ кгс.}$$

Сила, действующая на один крошштейн с учетом возможной перегрузки $n=1,2$,

$$p = np' = 1,2 \cdot 306 = 370 \text{ кгс.}$$

Для нахождения вертикальной и горизонтальной реакций в точках опирания кронштейна составляем уравнение равновесия относительно осей координат с началом в точке О (рис. 11-8): $\sum x=0$; $H_0-H_A=0$, откуда $H_A=H_0=H$; $\sum y=0$; $V_A-p=0$, откуда $V_A=p$; $\sum M=0$; $p(a+d)-V_A d-Hc=0$, ио $V_A=p$, откуда

$$H = \frac{pa}{c} = \frac{370 \cdot 15}{12} = 462 \text{ кгс.}$$

Опасными сечениями кронштейна являются горизонтальное сечение по $a-a$ и вертикальное по $b-b$. Вертикальное сечение более опасно, так как на него действуют моменты от двух сил: $M(H)$ и $M(V_A)$, поэтому ограничиваемся проверкой только этого сечения. Нормальная сила в сечении $b-b$ (рис. 11-8) $H=462$ кгс. Секующая сила $V_A=p=370$ кгс. Сумма моментов

$$\Sigma M = H \cdot 3,5 + p(7 - 6) = 462 \cdot 3,5 + 370 \cdot 1 = 1990 \text{ кгс} \cdot \text{см}$$

Геометрическая характеристика сечения кронштейна $F=2 \cdot 25 = 50 \text{ см}^2$.

Момент сопротивления (см. рис. 11-7).

$$W = \frac{b\delta^2}{6} = \frac{25 \cdot 2^2}{6} = 16,7 \text{ cm}^3.$$

Наибольшее нормальное напряжение в крайних волокнах кронштейна

$$\sigma = \frac{H}{F} + \frac{\Sigma M}{W} = \frac{462}{50} + \frac{1990}{16.7} = 9,3 + 119 = 128 \text{ кгс/см}^2.$$

Касательное напряжение по сечению крошштейна

$$\tau = \frac{p}{F} = \frac{370}{50} = 7,5 \text{ кгс/см}^2.$$

За допускаемое напряжение на растяжение при изгибе можно принять $\sigma_{\text{доп}} = 160 \text{ кгс/см}^2$, соответствующее рабочей температуре 500°C . Напряжения на срез незначительны с ними можно не считаться.

Сечения крошечейнов, расположенных в толще обмуровки, имеют температуры, ненамного превосходящие температуры обмуровки в этих сечениях. Объясняется это тем, что форма крошечейнов способствует хорошей растечке теплоты на охлаждению их по мере удаления от огневой поверхности обмуровки. Для обмуровок

рассмотренного типа сечение крошштейна на линии соприкосновения со сварочной изоляцией с днаutomым кирпичом находится в зоне температур, не превышающих 350–400°C. Поверочный расчет показывает, что сечения крошштейна удовлетворяют по прочности заданным условиям.

Проверим, достаточна ли прочность угольника для навешивания крошштейнов. Предварительный расчет показывает, что установка угольника без подкрепляющих ребер между крошштейнами с шагом 300 мм недостаточна для восприятия нагрузки от крошштейнов, вызывающих изгиб и срез в месте приварки к балке. Расчетная схема угольника с учетом укрепляющего ребра показана на рис. 11-9. В расчет вводятся укрепляющее ребро и часть длины угольника, ограниченная

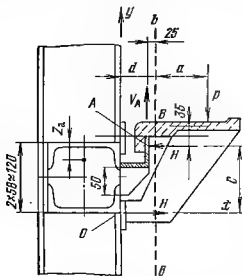


Рис. 11-8. Схема действующих усилий на разгрузочный крошштейн.

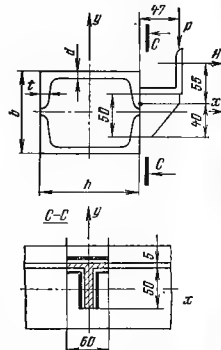


Рис. 11-9. Схема к расчету опорного угольника крошштейна.

значением $l \leq 10\delta$, где δ — толщина стенки угольника (по пять толщин на сторону от оси симметрии ребра). Считается, что большая длина угольника в работе не участвует.

Проверяются сварные швы в сечении C—C, где действуют секущая сила $Q = P = 370$ кгс; нормальная сила $N = H = 462$ кгс.

Расчетная площадь сварных швов с катетом ($\Delta = 6$ мм)

$$F_{св} = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 (5 + 6) = 9,2 \text{ см}^2.$$

Положение центра тяжести сварных швов относительно основания

$$\bar{y} \approx 2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot \frac{5 \cdot 2,5 + 6 \cdot 5,3}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 (5 + 6)} = 4,0 \text{ см.}$$

Момент инерции швов относительно основания

$$I_x \approx \frac{2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 5^3}{3} + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 5 \cdot 3^2 = 177 \text{ см}^4.$$

Момент инерции швов относительно центра тяжести

$$I_{x0} = I_x - F_{св} \bar{y}^2 = 177 - 9,2 \cdot 4^2 \approx 30 \text{ см}^4.$$

Момент, действующий на швы от сил P и H (относительно центра тяжести),

$$M = 370 \cdot 4,7 + 462 \cdot 5,5 = 4300 \text{ кгс} \cdot \text{см.}$$

Наибольшее скалывающее усилие, направленное перпендикулярно швам,

$$\tau_N = \frac{H_{св}}{F_{св}} + \frac{M \bar{y}}{I_{x0}} = \frac{462}{9,2} + \frac{4300 \cdot 4}{30} \approx 620 \text{ кгс/см}^2$$

Скалывающее усилие вдоль швов

$$\tau_l = \frac{P}{F_{св}} = \frac{370}{9,2} \approx 40 \text{ кгс/см}^2$$

Результирующее напряжение

$$\tau_{св} = \sqrt{\tau_N^2 + \tau_l^2} = \sqrt{620^2 + 40^2} \approx 622 \text{ кгс/см}^2.$$

Полученное напряжение невелико, прочность приварки угольника достаточна.

Опорная балка, на которую опираются крошштейны, выбирается коробчатого сечения, которое хорошо работает на скручивание.

Покажем на примере, как подсчитываются и проверяются напряжения в опасных точках сечения балки. Балка, показанная на рис. 11-9, состоит из швеллеров № 14, сваренных между собой. Геометрические характеристики (обозначения по ГОСТ) для швеллера № 14: $F' = 15,6 \text{ см}^2$; $z_0 = 1,67 \text{ см}$; $d = 4,9 \text{ см}$; $t = 8,1 \text{ мм}$.

Моменты инерции: $I'_x = 491 \text{ см}^4$; $I'_y = 45,4 \text{ см}^4$; статический момент половины сечения $S'_x = 40,08 \text{ см}^3$.

Характеристика сварной коробчатой балки (рис. 11-10):

$$F = 2F' = 2 \cdot 15,6 = 31,2 \text{ см}^2.$$

Моменты инерции и сопротивления (направленные осей см. на рис. 11-10):

$$I_x = 2(I'_y + F' \cdot a^2) = 2[45,4 + 15,6 (6 - 1,67)^2] \approx 680 \text{ см}^4;$$

$$W_x = \frac{2I_x}{b} = \frac{2 \cdot 680}{120} = 113,3 \text{ см}^3;$$

$$I_y = 2I'_x = 2 \cdot 491 = 982 \text{ см}^4;$$

$$W_y = \frac{2I_y}{h} = \frac{2 \cdot 982}{14} = 141 \text{ см}^3.$$

Статические моменты полусечений:

$$S_x = F' \left(\frac{h}{2} - z_0 \right) = 15,6 \left(\frac{12}{2} - 1,67 \right) = 67,5 \text{ см}^3;$$

$$S_y = 2S'_x = 2 \cdot 40,08 = 80,16 \text{ см}^3.$$

При принятой несущей конструкции для обмуровки все пролеты между стойками равны и нагрузки на них симметричны. Поэтому концы балок можно считать защемленными. Балка нагружена в вертикальной плоскости массой обмуровки, в горизонтальной — давлением газов, которое передается обшивкой. Условно считается, что на балку передается давление газов, действующее на площадь с основанием, равным ее пролету, $l=1,5$ м и высотой $h=3,0$ м.

Приложенная вне центра масса обмуровки скручивает балку. Схема приложения нагрузок и эпюры моментов показаны на рис. 11-7.

Экспонентитет приложения нагрузки от массы обмуровки (см. рис. 11-10)

$$a = 206 + 3 + 140/2 = 280 \text{ мм.}$$

Равномерно распределенная нагрузка от массы при пяти кронштейнах в пролете

$$q_y = \frac{p \cdot 5}{l} = \frac{370 \cdot 5}{1,5} = 1235 \text{ кгс/м.}$$

Секущая сила на опорах балки (равная реакции)

$$Q_y = \frac{q_y l}{2} = \frac{1235 \cdot 1,5}{2} = 925 \text{ кгс.}$$

Поскольку равномерно распределенная нагрузка от давления газов принята 300 кгс/м², то

$$q_x = \frac{300 \cdot 3 \cdot 1,5}{1,5} = 900 \text{ кгс.}$$

Секущая сила на опорах балки

$$Q_x = \frac{q_x l}{2} = \frac{900 \cdot 1,5}{2} = 675 \text{ кгс.}$$

Изгибающие моменты в защемлении балки: в вертикальной плоскости

$$M_x = \frac{q_y l^2}{12} = \frac{1235 \cdot 1,5^2}{12} = 232 \text{ кгс-м;}$$

в горизонтальной плоскости

$$M_y = \frac{q_x l^2}{12} = \frac{900 \cdot 1,5^2}{12} = 169 \text{ кгс-м.}$$

Скручивающий момент на концах балки

$$M_{кр} = \frac{q_y I a}{2} = \frac{1295 \cdot 1,5 \cdot 0,28}{2} = 260 \text{ кгс-м.}$$

Напряжения в различных точках сечения балки, кгс/см², подсчитываются по известным формулам:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{W_x}; \quad \sigma_y = \frac{M_y}{W_y},$$

от секущих сил

$$\tau_x \approx \frac{Q_x S_x}{I_x \cdot 2t}; \quad \tau_y \approx \frac{Q_y S_y}{I_y \cdot 2d}.$$

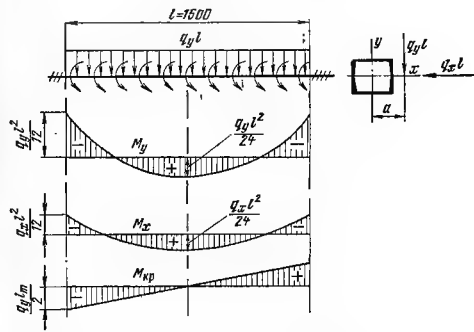


Рис. 11-10. Схема расчета опорной балки для кронштейнов.

от кручения для замкнутого контура (формула Бредта)

$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{2F_0 \delta}, \quad (11-6)$$

где F_0 — площадь, ограниченная средней линией стенок коробчатой балки; δ — толщина стенки в рассматриваемой точке.

Для рассматриваемого сечения

$$F_0 = (h - t)(b - d) = (14 - 0,81)(12 - 0,49) = 152 \text{ см}^2.$$

Для определения наибольшего напряжения от кручения открытых профилей или профилей, которые составлены из полос и у кото-

рых отношении высоты к толщине $h_1/\delta_1 \geq 10$, можно пользоваться формулой

$$\tau_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{кр}} \delta_{\text{макс}}}{\frac{1}{3} \sum h_i \delta_i^3}$$

Наибольшее напряжение имеет место в точке, лежащей посредине самой толстой полосы, входящей в составное сечение.

Действующие силы и опоры напряжений в сечении балки в месте ее заделки показаны на рис. 11-11, а.

Характерные точки, в которых необходимо проверить суммарные напряжения (A, B, C, D, K, L), показаны на рис. 11-11, б.

В точках A и L имеют место только напряжения от изгиба:

$$\sigma_A = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{232 \cdot 10^8}{113,3} + \frac{169 \cdot 10^8}{141} = 205 + 120 = 325 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\sigma_L = -\frac{M_x}{W_x} - \frac{M_y}{W_y} = -205 - 120 = -325 \text{ кгс/см}^2.$$

В точках B, C, D, K (рис. 11-11) имеет место плоское напряженное состояние (при сложении касательных напряжений их направления приняты по закону «парности»).

В точке B

$$\begin{aligned} \delta_B &= \frac{M_y}{W_y} = \frac{169 \cdot 10^8}{141} = 120 \text{ кгс/см}^2; \\ \tau_B &= \frac{M_{\text{кр}}}{2F_{\text{д}}} - \frac{Q_y S_x}{I_x \cdot 2t} = \frac{260 \cdot 10^8}{2 \cdot 152 \cdot 0,81} - \frac{925 \cdot 67,5}{680 \cdot 2 \cdot 0,81} = 50 \text{ кгс/см}^2. \end{aligned}$$

В точке C

$$\sigma_C = -\frac{M_y}{W_y} = -\frac{169 \cdot 10^8}{141} = -120 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\begin{aligned} \tau_C &= \frac{M_{\text{кр}}}{2F_{\text{д}}} + \frac{Q_y S_x}{I_x \cdot 2t} = \\ &= \frac{260 \cdot 10^8}{2 \cdot 152 \cdot 0,81} + \frac{925 \cdot 67,5}{680 \cdot 2 \cdot 0,81} = 164 \text{ кгс/см}^2. \end{aligned}$$

В точке D

$$\begin{aligned} \sigma_D &= \frac{M_x}{W_x} = \frac{232 \cdot 10^8}{113,3} = 205 \text{ кгс/см}^2; \\ \tau_D &= \frac{M_{\text{кр}}}{2F_{\text{д}}} - \frac{Q_x S_y}{I_y \cdot 2d} = \\ &= \frac{250 \cdot 10^8}{2 \cdot 152 \cdot 0,49} - \frac{675 \cdot 80,16}{982 \cdot 2 \cdot 0,49} = 177 - 62 = 115 \text{ кгс/см}^2. \end{aligned}$$

В точке K

$$\begin{aligned} \sigma_K &= -\frac{M_x}{W_x} = -205 \text{ кгс/см}^2; \\ \tau_K &= \frac{M_{\text{кр}}}{2F_{\text{д}}} + \frac{Q_x S_y}{I_y \cdot 2d} = 177 + 62 = 239 \text{ кгс/см}^2. \end{aligned}$$

Наиболее невыгодное сочетание напряжений в точке K. Эквивалентное (присвоенное) напряжение по энергетической теории прочности в этой точке

$$\sigma_{\text{эко}} = \sqrt{\sigma_K^2 + 3\tau_K^2} = \sqrt{205^2 + 3 \cdot 239^2} = 458 \text{ кгс/см}^2.$$

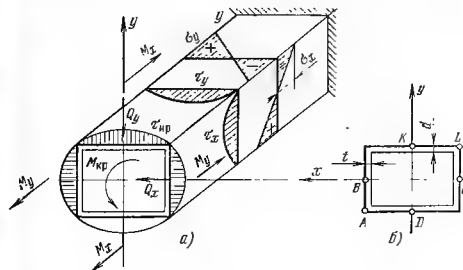


Рис. 11-11. Распределение напряжений в опорной балке.

а — схема напряжений; б — схема сечения балки.

Расчет показал, что напряжения в балке незначительны. Больших значений напряжения достигают в открытых профилях, которых при работе на кручение рекомендуется избегать.

Стойки, на которые опираются балки, обычно принято относить к каркасу котла; они опираются на основные несущие балки, расстояние между которыми рекомендуется принимать не более 6,0 м. Стойки обычно выполняются двутаврового сечения № 16 или 20. Нижний конец стоек плотно опирается на балку и приваривается к ней; верхний рекомендуется присоединять шарнирно на овальных отверстиях, которые позволяют верхней балке деформироваться при ее нагружении обмуровкой.

Стальная обшивка приваривается к балке и стойкам после выполнения обмуровки, т. е. после деформации металлоконструкций под воздействием нагрузки.

Для принятой конструкции оба конца стойки считаются шарнирно-опертыми.

Покажем на примере, как производится проверка стойки на прочность. Для рассматриваемого случая, если стойка выполнена из балки двутаврового сечения № 20, эксцентриситет нагрузки от обмуровки

$$a = 206 + \frac{200}{2} = 306 \approx 310 \text{ мм.}$$

Для расчета стойки в пролете стены выделяется полоса шириной $l=1500$ мм (на рис. 11-12 заштрихована). Принимается, что на эту заштрихованную площадь передается давление газов 300 кгс/м^2 , приходящееся на одну стойку:

$$p = 300 \cdot 1,5 = 450 \text{ кг/м.}$$

Полная нагрузка на стойку

$$Q_p = 450 \cdot 2 \cdot 3 = 2700 \text{ кгс.}$$

Нагрузка от массы обмуровки, приходящаяся на одну стойку,

$$p = q_y l = 1235 \cdot 1,5 = 1850 \text{ кгс.}$$

Горизонтальное распирающее усилие от воздействия массы на основные балки каркаса

$$H = p \frac{a}{2h} = 1850 \cdot \frac{0,31}{2 \cdot 3} \approx 96 \text{ кгс.}$$

Изгибающий момент в середине стойки от массы обмуровки

$$M_1 = Hh = 96 \cdot 3,0 = 288 \text{ кгс} \cdot \text{м.}$$

Изгибающий момент от давления газов в середине стойки

$$M_2 = \frac{Q_p l}{8} = \frac{2700 \cdot 6}{8} = 2030 \text{ кгс} \cdot \text{м.}$$

Геометрические характеристики двутавровой стойки № 20:

$$F = 26,8 \text{ см}^2; W_x = 184 \text{ см}^3; W_y = 115 \text{ см}^3.$$

Наибольшее напряжение в середине стойки

$$\sigma = \frac{p}{F} + \frac{M_1 + M_2}{W_x} = \frac{1850}{26,8} + \frac{2030 + 288}{184} = 69 + 1280 \approx 1330 < 1500 \text{ кгс/см}^2.$$

Так как к стойке в плоскости стены приваривается обшивка, то проверку на устойчивость в этой плоскости (по наименьшему радиусу инерции I_y) обычно не производят, поскольку обшивка создает большую жесткость в плоскости всей металлоконструкции.

Аналогичным образом производится расчет элементов щитовой обмуровки. В щитах, защищенных экранами, температура на огневой поверхности обмуровки в большинстве случаев не превосходит $450-500^\circ\text{C}$, поэто-

му чугунные кронштейны заменяются стальными опорами. При расчете стальных опор арматура, размещенная в футеровке и термоизоляционном бетоне, в расчет не принимается, и она выполняет роль притяжки обмуровки к металлоконструкциям щита.

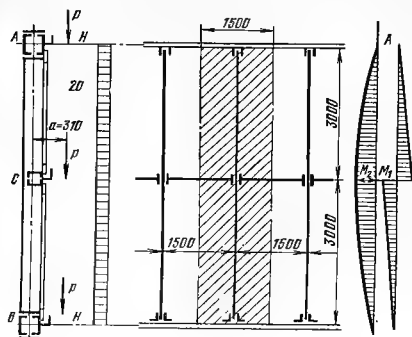


Рис. 11-12. Схема к расчету опорных стоек.

Конструкцию щитов проверяют на прочность не только для условий эксплуатации на котле, но и для возможности подъема и кантовки при монтаже. В последнем случае допускаются повышенные напряжения в элементах, поскольку они не постоянны и щит находится в холодном состоянии.

Глава двенадцатая

СТЕНДОВЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОГРАЖДЕНИЕ КОТЛОВ

12-1. КОНСТРУКЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Расчет температурного режима обмуровок из плит при их проектировании часто ведется по формулам для плоской стенки, что не соответствует фактическим усло-

виям ее работы. Проверка качества изготовления и прочностных характеристик бетона обмуровок из плит проводится на лабораторных образцах. Однако практика показывает, что расчеты и испытания по указанным методам не соответствуют действительному режиму работы обмуровок, поскольку действительный температурный режим обмуровки существенно отличается от расчетного, а технология изготовления жаростойкого бетона в обмуровке отличается от технологии изготовления лабораторных образцов. В результате возникают растрескивание и разрушение слоя огнеупорного бетона при удовлетворительных характеристиках испытанных образцов.

Несоответствие режима работы обмуровки из плит расчетному объясняется наличием значительного количества металлических включений и сложных форм жаростойкого бетона (тепловые «мосты»). Возникают перетоки теплоты от внутренней поверхности к наружной. Происходит инфильтрация воздуха в находящуюся под разрежением топку и газосходы котла, что приводит к их охлаждению. Однако эти эффекты в расчетах не учитываются.

Несоответствие прочности и стойкости обмуровки из плит с результатами испытаний образцов объясняется взаимодействием металла с керамикой при температурных деформациях и неоднородностью материала крупных плит. Иногда это может быть объяснено нарушением технологии изготовления жаростойкого бетона для обмуровочных плит, которое не удается обнаружить при испытаниях на прочность лабораторных образцов. При расчетах и испытаниях не принимают во внимание работу стыков плит, через которые могут возникать присосы воздуха или газов.

Тепловые и прочностные показатели обмуровки, состоящей из плит со стыками, могут быть получены при испытаниях на специальном стенде, который должен обеспечивать режимы, максимально приближенные к натурным.

В соответствии с этими задачами стенд должен обеспечивать установку плит со стыками, соизмеримыми с натуральными; регулируемые рабочие температуры на огневой стороне плит и регулируемое разрежение или давление в камере стенда.

Теплопроводность набивных масс, полученная на лабораторных образцах, значительно отличается от теплопроводности в натурных условиях, особенно у набивных масс с жидким стеклом. Стендовые испытания оштупанных утепленных экранов, несмотря на отсутствие взаимодействия набивки со шлаком, позволяют вести отработку и выбор оптимальной схемы шипования (вы-

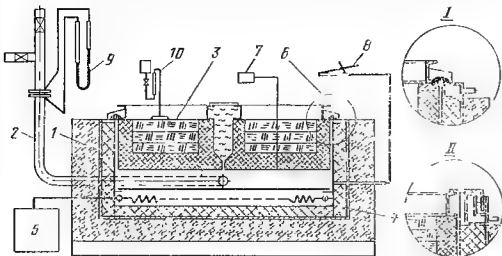


Рис. 12-1. Обмуровочный стенд.

1 — металлическая камера стенда; 2 — теплозащитная линия; 3 — обмуровочные плиты со стыками; 4 — электробогрей; 5 — трансформатор тока; 6 — узел уплотнения периметра плит (I — с охлаждающим контуром; II — с гидроразрывом); точки зачерном; 7 — температур по плите; 8 — разрежения в камере стенда; 9 — отсос воздуха; 10 — локальный присоса воздуха; 11 — присоса воздуха.

сота и диаметр шипов, плотность шипования, материал шипов и набивки) при проектировании утепленных экранов. Необходимо отметить, что стенд для испытания оштупанных экранов должен обеспечивать высокие тепловые потоки. Такие стенды для исследования тепловой работы обмуровок и утепленных экранов существуют на ЗиО. Стенд для испытаний обмуровок [12-1] представляет собой герметичную металлическую камеру, изолированную снаружи (рис. 12-1). Съемные плиты обмуровки (щиты), установленные на стенде, образуют замкнутый объем; разрежение в камере стенда создается вентилятором. Нагрев обмуровки ведется электронагревателем с регулирующим трансформатором ТСД/4-1000 и позволяет получать на внутренней поверхности плит температуру до 700°C.

Замер температур в конструкции обмуровки осуществляется с помощью хромель-алюмелевых или хромель-копелевых термопар, подключенных к самописцам типа ЭПП-09. Температурные поля на наружной поверхности обмуровки и тепловые потери в окружающей среду измеряются приборами ОРГРЭС (термощуп Т-4, термомер ИТП-2). Разрежение или давление в камере стенда и перепад давлений фиксируются микроанометрами типа ММН. Локальные прососы воздуха через обмуровочные плиты определяются расходомером ОРГРЭС-ЗиО компенсационного типа КР-1 [12-2]. Для тепловых испытаний ошпированных экранов на ЗиО созданы стенды с обогревом труб карборундовыми стержнями или кварцевыми лампами с йодным наполнением.

12-2. ИСПЫТАНИЯ НАКАРКАСНОЙ ОБМУРОВКИ МОНТАЖНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

При испытании обмуровки из плит монтажного изготовления изучались вопросы влияния металлической обшивки на растечку теплоты в районе стыка плит; температурного режима наружной каркасной рамы, закрытой слоем изоляции; режимов сушки и первого разогрева на прочность жаростойкого бетона; газопроницаемости обмуровочных плит и их стыков различной конструкции, а также качества изготовления обмуровки. Обмуровочные плиты, предназначенные для котлов, изготавливались на монтажных участках электростанций и доставлялись для испытаний на ЗиО. Примером необходимости проверки качества могут служить испытания плит со слоем упрочненного диатомобетона. Низкое качество бетона, приведшее к его растрескиванию, было обнаружено при нагреве плиты до рабочих температур (600°C). Лабораторные испытания образцов бетона, взятых при изготовлении плит, дали удовлетворительные прочностные характеристики [12-1].

На рис. 12-2 показано несколько типов обмуровок котлов, испытанных на стенде [12-3]. Обмуровочные плиты 1 состоят из слоя жаростойкого шамотобетона с боковыми стенками по периметру плит и металлической обшивки по нижней полке цвellerной рамы. Стык между плитами заполняется упрочненным диатомобетоном на глинозёмистом цементе. Конструкция была испытана с наружной металлической обшивкой, а после снятия

ее — с асбестовой штукатуркой. При одинаковых температурах на внутренней поверхности обмуровки и температуре окружающего воздуха потери теплоты в окружающую среду через наружную металлическую обшивку плит составили $q=378$ ккал/(ч·м²), а через слой штукатурки — $q=300$ ккал/(ч·м²); температура на наружной поверхности соответственно снизилась с 68 до 57°C. Температура на поверхности шамотных стенок плит в результате растечки теплоты по металлической

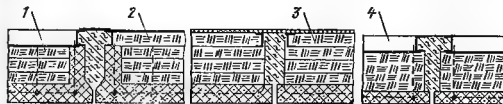


Рис. 12-2. Типы обмуровочных конструкций, испытанных на стенде.

1, 2 — плита котла типа П-50 соответственно без утепления рамы, с утеплением рамы; 3 — плита котла типа ПК-38; 4 — плита котла типа П-59.

обшивке уменьшается до 87°C. Незначительное отличие или равенство температур на наружной поверхности обмуровки в опытах с разрежением и без разрежения свидетельствует о газопроницаемости обмуровочной плиты даже при снятой металлической обшивке; об этом же свидетельствуют и низкие удельные локальные прососы воздуха через плиту [1,5—2,0 л/(ч·м²·мм вод. ст.)]. Полученная линейная зависимость расхода воздуха от разрежения в камере стенда указывает на ламинарный характер движения воздуха через поры обмуровочного материала, т. е. на отсутствие сквозных трещин в жаростойком бетоне и изоляции (рис. 12-3).

Присосы в стыках плит сильно зависят от плотности их заполнения. В проведенных испытаниях присосы воздуха через стык шириной около 100 мм составили от 0,5 до 10 м³/ч на 1 м длины. Такой разброс значений присосов воздуха указывает на необходимость тщательной герметизации стыков плит.

Испытания обмуровочных плит такой же конструкции, но с применением упрочненного диатомобетона вместо шамотобетона показали, что разрежение в камере стенда сильно влияет на температуру наружной поверхности обмуровки. При одинаковой температуре внутренней поверхности обмуровки и окружающего воздуха

температура наружной поверхности плит уменьшается с 55 до 30°C при изменении разрежения от 0 до 10 мм вод. ст. Замер локальных присосов воздуха по плите показал большой разброс их значений по точкам: при среднем удельном значении присоса воздуха в 55 л/(м² × 4 мм вод. ст.) максимальное значение составило 180 л/(м² · ч · мм вод. ст.). Осмотр плит после 250 ч испытаний показал сильное растрескивание слоя упрочне-

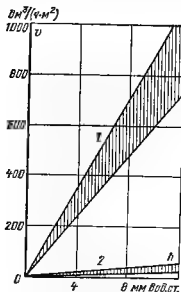


Рис. 12-3. Измерение локальных присосов воздуха через обмуровочные плиты.

1 — плиты котла типа ПК-39;
2 — плиты котла типа П-50 (без обшивки).

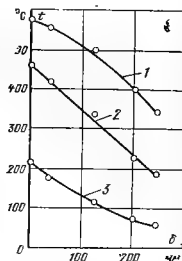


Рис. 12-4. Распределение температур по металлической скобе в обмуровке котла ПК-39.

1 — давление 2,5 мм вод. ст.;
2 — давление 0; 3 — разрежение 4,0 мм вод. ст.

го диатомобетона. При ознакомлении с изготовлением плит на монтажной площадке было обнаружено нарушение технологии изготовления: заливка бетона на севелитовые плиты производилась без надежной гидроизоляции.

Конструкция плиты 3, показанная на рис. 12-2, предполагала упрощение технологии изготовления бетонного слоя и уменьшение перетечек теплоты к наружной швеллерной раме за счет ликвидации теплопроводных бетонных стенок плиты. Жароупорный бетон в виде плоской плиты крепится к швеллерной раме металлическими скобами. Такая конструкция обмуровки без металлической обшивки не обладает достаточной газоплотностью.

При работе стенда под разрежением удельные локальные присосы воздуха составили около 80 л/(м² · ч · мм вод. ст.), а наружная температура обмуровки снизилась на 10—12°C. При работе стенда под давлением наблюдался рост температуры на наружной поверхности ограждения. Отсутствие газоплотности в данной конструкции плит и их стыка показывает распределение температур по металлической скобе, предназначенной для крепления бетонного слоя к швеллерной раме (рис. 12-4). Температура верхней полки швеллера в зависимости от давления или разрежения в камере стенда составляла, °C: 58 при разрежении 4 мм вод. ст.; 187 при нулевом давлении и 347 при избыточном давлении 2,5 мм вод. ст.

На основе стендовых испытаний накаркасной обмуровки монтажного изготовления были выданы рекомендации для проектирования. Так, например, толщина слоя шамотобетона (плиты и боковые столбики) была уменьшена от 100 до 60—70 мм, что снизило массовую характеристику обмуровки и тепловые потери в окружающую среду. Технология изготовления обмуровочных плит со слоем упрочненного диатомобетона была изменена с целью повышения качества бетона, а его применение в обмуровке НРЧ котла было исключено. Боковые бетонные стенки плиты, соприкасаясь с каркасной рамой, обеспечивают газоплотность и позволяют отказаться от металлической обшивки, сохранив ее только по стыкам плит.

12-3. ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА НА ТЕМПЕРАТУРУ ОБМУРОВКИ

Снижение температуры наружной поверхности обмуровки без металлической обшивки по сравнению с расчетной, не учитывающей фильтрацию воздуха, наблюдается и в эксплуатации. Для объяснения и оценки влияния фильтрации воздуха на температуру ограждения на ЗиО была разработана методика расчета [12-4], которая позволяет определять температуру наружной поверхности обмуровки с учетом фильтрации воздуха:

$$t_0 = \frac{t_{вн} + \frac{\alpha}{uc} t_b \left[\exp\left(\frac{vcH}{\lambda}\right) - 1 \right]}{1 + \frac{\alpha}{uc} \left[\exp\left(\frac{vcH}{\lambda}\right) - 1 \right]}, \quad (12-1)$$

где $t_{вн}$ — температура внутренней поверхности обмуровки, °C; α — коэффициент теплоотдачи от обмуровки к воздуху, ккал/(ч·м²·°C); H — толщина обмуровки, м; $t_{в}$ — температура воздуха, °C; v и c — объем, м³/(ч·м²), и теплоемкость, ккал/(м³·°C), проходящего через обмуровку воздуха.

Сопоставление результатов расчета с опытными данными дает удовлетворительную сходимость. Зависимость

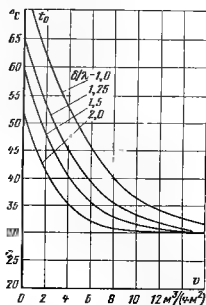


Рис. 12-5. Влияние фильтрации воздуха на температуру ограждения. [$t_{вн} = 500^{\circ}\text{C}$, $t_{в} = 30^{\circ}\text{C}$, $\alpha = 10$ ккал/(ч·м²·°C)].

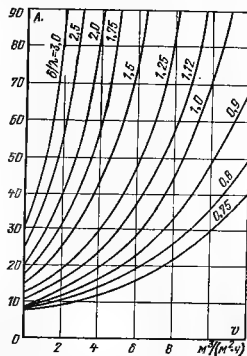


Рис. 12-6. Зависимость параметра A от количества воздуха v при расчете влияния фильтрации воздуха на температуру наружной поверхности обмуровки.

t_0 от количества проходящего через обмуровку воздуха v показана на рис. 12-5. По этой методике можно вести расчеты охлаждаемых конструкций с применением керамических материалов, например, опорных балок конвективных поверхностей нагрева или других устройств с принудительной подачей воздуха на охлаждение. Для простоты использования формулы (12-1) входящее в него выражение $\exp\left(\frac{vcH}{\lambda}\right) - 1 = A$ представлено в виде

номограммы на рис. 12-6, а с учетом этого обозначения формулу (12-1) можно записать в следующем виде:

$$t_0 = \frac{t_{вн} + \frac{\alpha}{vc} t_{в} A}{1 + \frac{\alpha}{vc} A} \quad (12-2)$$

12-4. ИСПЫТАНИЯ ОБМУРОВКИ АВТОКЛАВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Сборная обмуровка из плит автоклавнового изготовления прошла серию стендовых испытаний. Исследовалась тепловая работа модификаций плит из различных материалов для жаростойкого бетона при разной конструкции крепления плит и разных вариантах их стыковки. Проверялись различные составы материалов для набивки стыков плит, газоуплотнители и т. д. Испытания показали, что наиболее качественным является шамотобетон на портландцементе с тонкомолотой добавкой. Упрочненный диатомобетон склонен к растрескиванию, поэтому он не был рекомендован для обмуровки котлов. Это подтвердилось при промышленном испытании плит на котле ПК-41. В процессе испытаний найден оптимальный вариант конструкции стыков плит, их крепления, проверены теплозащитные свойства, прочностные характеристики жаростойкого бетона и известково-кремнеземистой изоляции.

Сборка и испытания обмуровочного блока из плит автоклавнового изготовления [12-5] позволили вскрыть ряд недостатков в технологии их изготовления и дать рекомендации по их устранению.

После первых растопок котла П-59 при осмотре обмуровки были обнаружены разрушение шамотного слоя отдельных плит автоклавнового изготовления до сетки и полное разрушение бетона обмуровки монтажного изготовления. Это потребовало дополнительной проверки влияния сушки и первого разогрева сборной обмуровки на прочность жаростойкого бетона. Испытания были проведены на образцах $250 \times 250 \times 200$ мм в Харьковском филиале ЦКБЭнерго и на натуральных плитах на стенде ЗнО [12-6]. Для обмуровки котлов режим сушки и первого разогрева предусмотрен инструкцией [12-7], состоящий из нагрева обмуровки до температуры 100 – 110°C

за 6—8 ч, выдержки при данной температуре в течение суток, повышения температуры до 500—550°C со скоростью 30—40°C/ч, выдержки при данной температуре 8—10 ч и дальнейшего подъема температуры до рабочей со скоростью 60—80°C/ч. Первые плиты были испытаны по режиму, предусмотренному инструкцией, но часть из

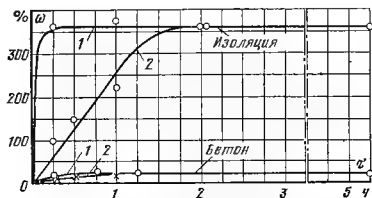


Рис. 12-7. Водонасыщаемость бетона и изоляции. 1 — полное погружение материала в воду; 2 — контакт нижнего слоя с водой.

них была предварительно максимально увлажнена. Водонасыщаемость бетона и изоляции плит показана на рис. 12-7. Опыты показали, что повышенные против инструкции скорости разогрева и отсутствие предварительной сушки плит приводят к их разрушению; жаростойкий бетон обмуровочных плит автоклавного изготовления выдерживает режим сушки и первого разогрева обмуровки, если их вести по инструкции [12-7]. Правильный режим сушки и первого разогрева жаростойких бетонов имеет решающее значение для их дальнейшей работы.

Последующие стендовые и промышленные опыты по сушке и первому разогреву обмуровок котлов, а также теоретические исследования и расчеты, проведенные НИИЖБ, показали, что существующая инструкция по сушке и первому разогреву обмуровок нуждается в усовершенствовании [12-8].

Вышесказанное показывает необходимость применения стендов и целесообразность их использования не только в исследовательских лабораториях организаций, но и на монтажных площадках и участках изготовления деталей обмуровок.

Следует отметить, что стенд ЗиО хотя и позволяет вести отработку и усовершенствование обмуровочных конструкций, однако взаимодействие жаростойкого бетона обмуровки с факелом, вибрационные нагрузки на обмуровку можно проверить только в рабочих условиях непосредственно на котле.

12-5. ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОПЛОТНЫХ ЭКРАНОВ

Испытания изоляции газоплотных экранов проводились на обмуровочных стендах и на натурных узлах, но в заводских условиях.

Напыляемая и комбинированная изоляция (напыляемая поверх плит) были испытаны на модели топки с размерами 0,5×1,0 м, высотой 3,0 м, изготовленной из плавниковых труб диаметром 32×6 мм (сталь 12Х1МФ) с шагом 48 мм. Модель обогревалась электричеством с возможностью регулирования тепловой нагрузки. На модели было опробовано два типа натрубной изоляции: напыляемой в один слой ($\delta=150\pm160$ мм) асбоперлитовой изоляции (см. рис. 7-12) и комбинированной изоляции, состоящей из 100 мм слоя известково-кремнеземистых плит и слоя напыляемой изоляции (см. рис. 7-9, в) толщиной 50 мм. Напыляемая изоляция выполнена комбинатом ЦЭТИ. Изоляция сделана на калиевом жидком стекле и имеет в своем составе по 50% перлита и асбеста III сорта с добавкой 10% сверх 100% нефелинового антипирена. Для армировки изоляции приминена проволока сетка диаметром 4 мм с ячейками 250×250 мм, приваренная к штырям диаметром 6 мм, которые с шагом 500×500 мм приварены к плавникам труб. Обшивка выполнялась металлическим листом с высотой гофра 80 мм. В испытаниях было зафиксировано снижение температуры выступающей части гофра примерно на 15°C. Влияние воздушного зазора на температуру наружной поверхности ограждения оценивалось и расчетным путем (см. гл. 7). Расчеты на прочность показали, что высота гофра может быть уменьшена до 35—40 мм.

В процессе опытов были определены теплофизические характеристики напыляемой асбоперлитной изоляции: коэффициент теплопроводности (при средней плотности 215 кг/м³ и средней температуре 250—300°C) составил около 0,09 ккал/(м·ч·°C), что близко по значению к теплопроводности известково-кремнеземис-

той изоляции. Теплозащитные свойства испытанных напыляемой и комбинированной изоляций оказались практически одинаковыми, хотя для напыляемой изоляции они зависят от сорта асбеста [12-9].

12-6. СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ УТЕПЛЕННЫХ ЭКРАНОВ

На стендах ЗиО велись исследования тепловой работы утепленных экранов с ошпикованными и оребренными трубами. Проверялось влияние геометрических параметров шипов (диаметра, высоты, конфигурации, плотности шпикования) и типа набивной массы (хромитовой, хромомангnezитовой, карборундовой и др. с различными связками и добавками) на распределение температур в утепленной поверхности. Испытывались шипы из различных марок сталей (Ст. 10, 12Х1МФ, ОХ13, Х6СЮ, Х11СЮ, 1Х18Н10Т и др.), проверялись их тепловая работа и качество приварки к трубам.

В качестве примера на рис. 12-8 показаны результаты испытаний панели из утепленных ошпикованных труб [12-10]. Панель состоит из 14 труб из стали 12Х1МФ диаметром 32×6 мм с шагом 36 мм, охлаждаемых водой. Скорость охлаждаемой воды составляет около 1,5 м/с; коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности стенки к воде около $5 \cdot 10^3$ ккал/(м²·°С). Трубы покрыты шипами из той же стали 12Х1МФ высотой 15—17 мм в два ряда с шагом вдоль трубы 30 мм с помощью автомата типа АШ-1 [8-6] и корундовой набивкой на ортофосфорной кислоте.

В области рабочих температур (около 1000°С) теплопроводность корундовой набивки близка к $1,0$ ккал/(м·ч·°С).

Для измерения температуры в металле труб и шипов зачеканивались хромель-алюмелевые термопары диаметром 0,2 мм. Термопары были размещены и по поверхности набивки. Из рис. 12-8 видно, что избыточные температуры в корундовой набивке при тепловом потоке $100 \cdot 10^3$ ккал/(м²·ч) составляют 980—1000°С и практически не отличаются от значений, полученных на этой же панели с хромитовой набивкой, но значительно превышают уровень температур, наблюдавшийся при более теплопроводной [$\lambda = 4 \div 5$ ккал/(м·ч·°С)] карборундовой набивке. Максимальная избыточная температура в шипах при тепловом потоке $100 \cdot 10^3$ ккал/(ч·м²)

составляет около 270°С и близка к избыточной температуре при хромитовой набивке (290°С). Таким образом, при температуре среды (около 400°С), протекающей по трубам НРЧ котла, максимальные температуры на поверхности малотеплопроводных набивок (хромитовой, корундовой и др.) достигают верхнего допустимого предела (1500°С), что может привести к разъеданию набивки шлаком и вызывать оголение и обгорание шипов.

На стенде были испытаны трубы с поперечными ребрами [12-11] для утепленного экрана. Трубы диаметром 32×6 мм с ребрами из стали 12Х1МФ имеют размеры, показанные на рис. 12-9; накатанные ребра: $h=6,9$ мм; $\delta=1,7$ мм; $s=5,7$ мм; $\delta_{ст}=2,8$ мм; $d_{вкл}=18,9$ мм; приварные ребра: $h=7,7$ мм; $\delta=1,8$ мм; $s=6,4$ мм. Испытания проводились с карборундовой, хромитовой и корундовой набивками. Максимальная избыточная температура ребра при $q=100 \cdot 10^3$ ккал/(ч·м²) составила для модели из труб с накатанными ребрами: 155°С при карборундовой набивке; 186°С при электрокорундовой; для модели с приварными ребрами: 135°С — при карборундовой и 161°С — при хромитовой набивке.

Избыточная температура набивной массы на участке между трубами при плоском профиле набивки соответственно была 450, 690, 285 и 880°С. На участке между ребрами эта температура соответственно составила 200 и 500, 210 и 460°С. При укладке набивки по профилю вершин ребер температура набивки между трубами была меньше, чем температура в набивке между ребрами. Испытания образцов труб с поперечными

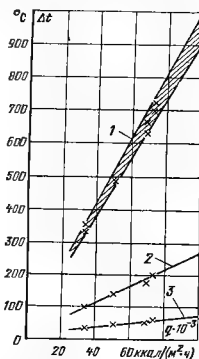


Рис. 12-8. График избыточных температур в панели ошпикованного экрана с малотеплопроводной набивкой. 1 — по наружной поверхности набивки; 2 — в вершине шипа; 3 — в стенке трубы на участке между шипами.

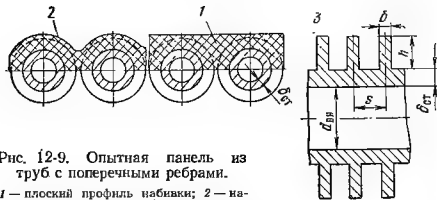


Рис. 12-9. Опытная панель из труб с поперечными ребрами.

1 — плоский профиль набивки; 2 — набивка по профилю ребра; 3 — геометрия ребренной трубы.

ребрами на разрыв показали, что поперечные ребра упрочняют трубу. Испытания показали, что температура в утепленном экране из труб с поперечными ребрами значительно меньше по сравнению с температурой в ошпорованном экране.

12-7. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СБОРНОЙ ОБМУРОВКИ ИЗ ПЛИТ АВТОКЛАВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В период монтажа котла ПК-41 на левой боковой стене были установлены опытные участки обмуровки из двухслойных извлектово-кремнезистых плит (ИКП) (рис. 12-10). Площадь опытного участка в нижней радиационной части (НРЧ) в районе факела составила 12 м^2 (10 плит с размерами $1,0 \times 1,0 \times 0,2 \text{ м}$ и 4 плиты $1,0 \times 0,5 \times 0,2 \text{ м}$ со слоем шамотобетона). опытный участок в верхней радиационной части (ВРЧ) имел площадь 10 м^2 (8 плит $1,0 \times 1,0 \times 0,2 \text{ м}$ и 4 плиты $1,0 \times 0,5 \times 0,2 \text{ м}$ со слоем упрочненного диатомобетона). Внешняя поверхность опытных участков была выровнена асбоцементной штукатуркой по металлической сетке, поверх которой комбинатом ЦЭТИ нанесено защитное синтетическое покрытие из смолы ФФ (1Ф) по стеклотканни. Типовая обмуровка котла имела толщину 350 мм в районе НРЧ и 330 мм в районе ВРЧ. Из общей толщины плит на долю бетона (шамотобетон в НРЧ и упрочненный диатомобетон в ВРЧ) приходилось 80—100 мм, поверх которого была положена совелиповая изоляция. Швеллерная рама плит была закрыта слоем изоляции, на которую был нанесен по сетке слой магнезиальной обкладки (рис. 12-10). Замеры температур на правой боковой стене показали, что средняя температура участка

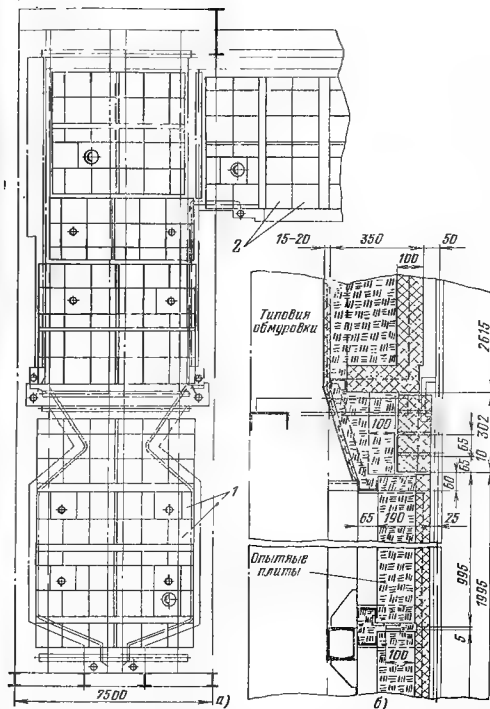


Рис. 12-10. Опытный участок обмуровки из плит автоклавного изготовления.

а — вид на боковую стенку толпки котла ПК-41; б — узел стыка опытной и типовой обмуровки котла; 1 — плиты в районе НРЧ; 2 — плиты в районе ВРЧ.

обмуровки монтажного изготовления составляла около 57°C с отдельными пиками температур до 70—80°C [12-12]. На опытном участке левой стены точки для замеров температуры были выбраны с шагом 500 мм по горизонтали и 750 мм по вертикали. Средняя температура этой обмуровки НРЧ составила 48°C с пиками температур до 58°C. Тепловые потери через типовую обмуровку примерно на 30% превышают потери на опытном участке. При замене труб НРЧ представилась возможность осмотра опытного участка обмуровки котла, который проработал 14 550 ч и имел 49 пусков. Было обнаружено, что опытный участок обмуровки находился в хорошем состоянии, отслоения изоляции от бетона не наблюдалось, поверхность шамотного слоя была ровная без признаков разрушения. Образцы шамотобетона, взятые из плит, имели прочность на сжатие $\sigma_{сж} = 140 \div 190$ кгс/см². Шамотобетон плит монтажного изготовления, расположенный на правой боковой стене НРЧ в тех же температурных условиях, что и опытный участок, был местами разрушен (бетон крошился из-за недостаточной прочности). Следует отметить, что обмуровка НРЧ котла ПК-41 в зоне горения факела находится в тяжелых условиях: максимальная расчетная температура внутренней поверхности обмуровки при работе котла на мазуте $t_{\text{макс}} = 711^\circ\text{C}$. По данным МО ЦКТИ максимальная замеренная температура обмуровки НРЧ составляет 670—713°C при работе котла на газе и 710—725°C при работе котла на мазуте. Однако указанные условия работы обмуровки не могут быть единственной причиной разрушения шамотобетона монтажного изготовления; причиной резкого снижения качества могло быть нарушение технологии изготовления обмуровочных плит.

Осмотр наружной поверхности обмуровки показал, что синтетическое покрытие опытного участка обмуровки НРЧ находилось в удовлетворительном состоянии, а опытного участка ВРЧ в неудовлетворительном: наблюдалось его отслоение и местное разрушение. В местах отслоения были видны следы золы, что указывает на периодическую работу поворотной камеры с подпором (1,5—2,0 мм вод. ст.) и на плохое состояние обмуровки. Установленные здесь двухслойные ИКП с укрепленным диатомобетоном были пониженного качества и при испытаниях на стенде растрескивались.

Проведенный комплекс стендовых и промышленных испытаний позволил рекомендовать новый тип сборной обмуровки из двухслойных ИКП для внедрения на котлах П-59 в энергоблоках 300 МВт и П-57 в энергоблоках 500 МВт.

12-8. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ГАЗОПЛОТНЫХ КОТЛОВ

Первое опробование натрубной изоляции для газоплотных экранов было проведено ЗиО совместно с комбинатом Центроэнерготеплоизоляция (ЦЭТИ) и трестом ОРГРЭС на цельносварной панели СРЧ котла ПК-38 Березовской ГРЭС [12-13].

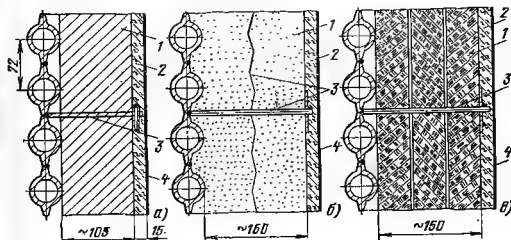


Рис. 12-11. Опытные участки изоляции цельносварной СРЧ.

а — известково-кремнеземистые плиты; б — напыляемая абсорбирующая изоляция; в — перлитогелевые плиты; 1 — изоляция; 2 — шпакатурка; 3 — элемент крепления изоляции; 4 — газоплотное покрытие.

Работы по установке опытных участков изоляции проводились в период монтажа котла. Наиболее подходящим участком для установки оказалась половина фронтальной и правой боковой стены от отметки 22 700 до 27 600 мм. С учетом температурных удлинений экранов опытный участок изоляции был уплотнен по всему периметру.

Опытные участки изоляции СРЧ из плавниковых труб показаны на рис. 12-11. Первый опытный участок

обмуровки (рис. 12-11,а) площадью 17 м² расположен на фронтальной стене и выполнен из известково-кремнеземистых плит 1000×500×105 мм. Плиты устанавливались насухо без раствора; образовавшиеся в некоторых местах зазоры между ними заполнялись асбестовыми шнуром и картоном. Плиты к плавниковым трубам крепились двумя способами: 1) общей полосой (протяжка к экрану одновременно 4—5 плит, как показано на рис. 12-12, а); 2) каждая плита устанавливалась на

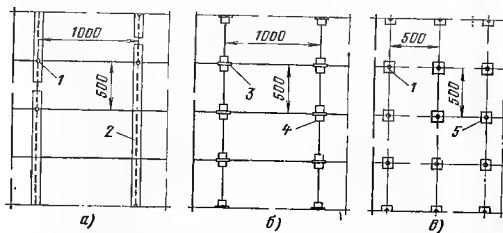


Рис. 12-12. Типы креплений участков изоляции.

а — крепление ИКП прижимной полосой; б — крепление ИКП с помощью полки с клином; в — штырьное крепление с прижимной шайбой; 1 — штырь; 2 — прижимная полоса; 3 — полка; 4 — клин; 5 — прижимная шайба.

полки, приваренные к плавникам труб. Полка имеет прорез, в которую вставляется металлический клин из полосы толщиной 1,5 мм (рис. 12-12, б).

Второй опытный участок изоляции площадью 15 м² расположен в правом углу топки и выполнен асбоперлитовым напылением на связке из жидкого стекла. Для крепления напыляемой изоляции к плавникам труб приварены штыри из стали 12Х1МФ с шагом 500 мм по высоте и ширине; изоляция армируется по штырям и закрепляется шайбами (рис. 12-12, в).

Третий опытный участок обмуровки площадью 6 м², расположенный на правой боковой стене у оси топки, выполнен из перлитогелевых плит 500×500×40 мм. Плиты установлены в три слоя с перекрытием швов и с промазкой их асбестовой масткой. Крепление плит

выполнено обвязкой стальной проволокой по приварным штырям, последний слой плит закреплен шайбами, как показано на рис. 12-12, в. Вся поверхность опытных участков (40 м²) после года эксплуатации была покрыта асбоцементной выравнивающей штукатуркой толщиной примерно 15 мм, поверх которой нанесен слой синтетического покрытия. Показатели опытной изоляции и накаркасной кирпичной кладки котла ПК-38 сведены в табл. 12-1.

Таблица 12-1

Показатели изоляции и накаркасной кирпичной кладки котла ПК-38

Тип обмуровки	Накаркасная кирпичная обмуровка, кг/м ²	Нагрубная обмуровка, кг/м ²		
		Известково-кремнеземистые плиты	Напыляемая изоляция	Перлитогелевые плиты
Обмуровка (изоляция)	278	22	34	30
Штукатурка	—	21	21	21
Крепления	12	5,0	1,5	1,5
Отделочный слой (обшивка или полимеры)	23	3,0	3,0	3,0
Всего	313	51	59,5	55,5

Из данных табл. 12-1 видно, что масса выравнивающего слоя штукатурки составляет 35—40%. При механизированном способе нанесения синтетического покрытия можно будет отказаться от выравнивающего слоя.

По данным лабораторных исследований и промышленных испытаний комбината ЦЭТИ, асбоперлитовая напыляемая тепловая изоляция при использовании асбеста III сорта имеет следующие показатели:

Объемная масса, кг/м ³	190—220
Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°С)	0,061+0,00011t _{ср}
Сопротивление, кгс/см ²	
сжатие без деформации	0,1
изгибу	1,0—1,2
расталению	0,08—0,1
Температура применения, °С	600
Гигроскопичность по массе, %	5

Для защиты опытной изоляции плавниковой СРЧ от механического повреждения было использовано син-

тетическое покрытие ЦКТИ на базе термореактивных смол, армированных стекловолокном [6-6]. Опытный участок изоляции после года эксплуатации был покрыт полиэфирной смолой ПН-1с, уступающей по некоторым свойствам эпоксидной смоле ЭД-6, но более дешевой и менее дефицитной. Основные свойства обеих смол представлены в табл. 12-2.

Таблица 12-2

Свойства полиэфирной смолы ПН-1с и эпоксидной ЭД-6

Свойства	Смола	
	полиэфирная	эпоксидная
Прочность при растяжении, кгс/мм ²	4,2—7,0	2,8—9,1
Прочность при изгибе, кгс/мм ²	6,0—13,0	9,1—14,7
Усадка, %	2,8—8,0	0,1—0,4
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ ·1/°C	7,0—10,0	3,1—9,0
Адгезия к стекловолокну, кгс/мм ²	0,79	3,65
Температура применения, °C	80—95	150—200
Наиболее важные ограничения	Усадка при отверждении	Растрескивание при повышении температуры
Цена в условных единицах	0,3—0,5	0,65—1,3

В качестве армирующего материала при механизированном способе нанесения применялся жгут из стекловолокна Ж-24-60, который рубился специальным механизмом. При ручном нанесении для армирования применялась сетка из стекловолокна марки СС-1 и в качестве наполнителя — асбест VII сорта.

Осмотр изоляции опытных участков через 5400 ч работы, во время которых было проведено 32 растопки котла, показал, что опытные участки, несмотря на отсутствие поверхностного уплотнительного слоя, не имели трещин и разрушений. При тепловых испытаниях опытных участков изоляции каналы из плавниковых труб периодически измерялись температуры и тепловые потоки от обмуровки по методике ОРГЭС [12-14].

Тепловые испытания показали хорошие теплозащитные характеристики смонтированных конструкций (табл. 12-3).

Рассчитанный по результатам измерений коэффициент теплопроводности составил 0,07 ккал/(м·ч·°C) для участка известково-кремнеземных плит и

Таблица 12-3

Характеристики изоляции опытных участков

Замеряемая величина	Известково-кремнеземные плиты			Асбоперлитовое напыление			Кирпичная обмуровка		
	Номера замеров								
	1	2	3*	1	2	3	1	2	3
Средний удельный тепловой поток $q_{ср}$, ккал/(ч·м²): от обмуровки от металлических креплений (полос)	141	146	209	112	143	123	205	260	381
	152	191	270	—	—	—	275	330	350
Средняя температура поверхности t , °C: обмуровки . . металлических креплений (полос) . . экрайных труб плавников . . середины (по глубине) штырей	39	46	(45)	39	47	45	41	56	50
	38	46	122	—	—	74	46	80	59
	343	353	348	363	355	356	—	—	—
	356	377	361	370	368	370	—	—	—
	189	219	227	255	292	274	—	—	—

* После работы с покрытием из смолы ПН-1с. Замеры 1, 2, 3 проводились примерно через полгода.

0,073 ккал/(м·ч·°C) для участка асбоперлитового напыления при средней температуре около 200°C.

Удельные тепловые потоки от наружной поверхности изоляции в окружающую среду в среднем составляют около 140—200 ккал/(ч·м²), что приблизительно на 50—60% меньше тепловых потерь через кирпичную обмуровку. Кроме того, подобная натрубная изоляция (см. табл. 12-1) имеет в 5—6 раз меньшую массу по сравнению с накаркасной обмуровкой, что приводит к снижению нагрузки на каркас котла.

Положительные результаты проверки в эксплуатационных условиях изоляционных материалов на опытных участках позволяют рекомендовать эти материалы для закрытия газоплотных экранов. Целесообразно на участках со сложной конфигурацией поверхности создавать напыляемую изоляцию, а на плоских — более простую в монтаже изоляцию из плит. При этом для котлов на сверхкритические параметры толщина изоляции при $\lambda = 0,07$ ккал/(м·ч·°С) будет составлять примерно 150 мм.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Соотношение между единицами системы МКГСС и системы, основанной на калории, с единицами системы СИ

Наименование величин	Значения в единицах системы МКГСС и калориях	Значения в единицах СИ
Теплота	1 кал	4,1868 Дж
Тепловой поток	1 ккал/ч	1,163 Вт
Плотность теплового потока	1 ккал/(ч·м ²)	1,163 Вт/м ²
Работа	1 кгс·м	9,80665 Дж
Энергия	1 кВт·ч	3,6·10 ⁶ Дж
Килограмм-сила	1 кгс	9,80665 Н
Давление, напряжение	1 мм вод. ст.	9,80665 Па
	1 мм рт. ст.	133,322 Па
	1 ат	98,0665·10 ³ Па
	1 кгс/см ²	98066,5 Па ≈ 0,1 МПа
Энтальпия удельная	1 ккал/кг	4,1868 Дж/кг ~ 4,2 Дж/кг
Теплоемкость удельная	1 ккал/(кг·°С)	4,1868 кДж/(кг·К)
	1 ккал/(м ³ ·°С)	4,1868 кДж/(м ³ ·К)
Динамическая вязкость	1 кгс·с/м ²	9,80665 Па·с
Коэффициент теплопроводности	1 ккал/(м·ч·°С)	1,163 Вт/(м·К)
Коэффициент теплопередачи	1 ккал/(м ² ·ч·°С)	1,163 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент излучения	1 ккал/(ч·м ² ·К ⁴)	1,163 Вт/(м ² ·К ⁴)
Постоянная излучения абсолютно черного тела	4,9 ккал/(ч·м ² ·°С)	5,67 Вт/(м ² ·К ⁴)

Основные обмурочные и изоляционные материалы

Наименование	ГОСТ, ТУ, ведомственные нормативно-директивные материалы	Область применения	Предельная темпе- ратура применения, °С
<i>Огнеупорные и жаростойкие материалы</i>			
Огнеупорный кирпич нормаль- ный и фасонный	ГОСТ 390-69. Форма и раз- меры ГОСТ 8691-73	Футеровка газоходов, горелок (амбразуры)	1600
Шамотные легковесные изде- лия (кирпич и др.)	ГОСТ 5040-68. Форма и размеры ГОСТ 8691-73	В качестве высокотемператур- ной изоляции	1400
Кирпич каолиновый для топок паровых котлов	МЧМ СССР Главогнеупор ТУ 8-52-72	Футеровка горелочных уст- ройств (амбразуры)	1600
Заполнители алюмосиликатные для огнеупорных бетонов	МЧМ СССР Главогнеупор И-25 ТУ 14-3-145-75	Для приготовления огнеупор- ных и жаростойких шамото- бетонов	—
Шамотобетон на глиноземистом цементе ГОСТ 19038-73 (огнеупорность $\leq 1580^{\circ}\text{C}$)	Приготовление по инструк- ции Минэнерго. Утверж- дено решением Главтеп- лоэнергомонтажа № 5 от 21/XII 1970. Изд. 1973 г. Инструкции Госстроя СН 156-67	Футеровка топок, конвективных газоходов. Мелкозернистый состав по сетке в качестве защитного слоя для натруб- ных обмуровок	1300
Шамотобетон на портландце- менте с токомолотой добав- кой ГОСТ 20910-75 (огне- упорность $\leq 1580^{\circ}\text{C}$)	То же	То же	1100

Шамотобетон на портландце- менте с добавкой триполи- фосфата натрия а) Тяжелый ПФБТ, $\gamma =$ $= 1,8 \text{ тис/м}^3$ б) Легкий ПФБЛ, $\gamma =$ $= 1,3 \text{ тис/м}^3$	Приготовление по инструк- ции УралВТИ. Состав принят по протоколу Со- юзэнергозащиты Мини- энерго от 7-8/VIII 1972	Футеровка топок и конвектив- ных газоходов и т. д.	Для тяжелого бе- тона 1300; для легкого бетона 900
Мертели огнеупорные алюмо- силикатные пластифициро- ванные	МЧМ Главогнеупор ГОСТ 6137-61	Для приготовления раство- ров при кладке из кирпичей и фасонов	Рабочая температу- ра соответствует температуре кладки
Молотые порошки шамота и огнеупорной глины	МЧМ Главогнеупор ТУ 14-8 90-74	Для приготовления огнеупор- ных растворов	—
Хромитовый бетон	Инструкция Госстроя СССР (СН 156-67)	Для футеровки горелочных аппаратов и особо горячих участков	1500
Упрочненный асбестодиадомо- вый бетон	Приготовление по инструк- ции ОРГЭС Минэнерго	Для футеровки экранирован- ных газоходов	1000

Специальные набивные массы

Хромитовые массы ПХМ-1 (без добавки глины), ПХМ-6 (с добавкой глины)	МЧМ Главогнеупор ТУ 14-8-84-73	Для футеровки подов топок с жидким шлаком. Для футе- ровок шиповых экранов	1400
Карборундовые массы на жид- ком стекле и полифосфатной связке	Приготовление по инструк- циям ОРГЭС и УралВТИ	Для наиснения по шипам экра- нов	1600

Наименование	ГОСТ, ТУ, ведомственные нормативно-директивные материалы	Область применения	Предельная температура применения, °С
Хромомагнеситовая масса	Приготовление по инструкции ОРГЭС Минэнерго	Для футеровки экранов в топках, сжигающих угли с осипными шлаками	1500
Корундовая масса на фосфатной связке	Приготовление по инструкции ОРГЭС Минэнерго	Для футеровки экранов высоконапряженных топочных объемов	1600—1650

Теплоизоляционные материалы

Диагномовый термозоляцион- ный кирпич	ГОСТ 2694-67	Для кладки высокотемпературной изоляции	900
Асбестодиагномовый термозо- ляционный бетон	Приготовление по инструкции Энергомонтажпроекта от 21/XII 1970. Инструкция ОРГЭС Минэнерго	Для высокотемпературной изоляции стен и коллекторов	900
Перлитобетон на цементной связке	Приготовление по инструкции ЦЭТИ Главэнерго- стройпрома	Для изоляции в области температур до 600°С	600
Перлитный щебень и песок вспученный	ГОСТ 10832-74	Для засыпной изоляции. Приготовление изоляционного бетона	800
Асбозурит	ГМСС ТУ-130-83	Для мастичной изоляции в качестве подмазочного слоя	600

Асбестовермикулитовые изде- лия	ГОСТ 13450-68	Применяется в виде плит для изоляции поверхностей	600
Асбоперлитные изделия на це- ментной связке	ГКПСМ МРТУ 21-4-64	Применяется в виде изоляци- онных плит	600
Перлитогелевые изделия	ТУ № 2-67 Минэнерго и ВТУ 31-65 Главэнерго- стройпрома	То же	650
Совелитовые изделия	ГОСТ 6788-74	» »	500
Совелитовый порошок	ММС СССР ТУ-36-131-69	Для кладки совелитовых плит в качестве раствора	500
Известково-кремнеземистые плиты (ИКИ)	МРТУ-34-48-4601-77 и ВТУ 00-01-63	Для изоляции ограждений па- ровых котлов (второй слой)	600
Вулканиковые изделия	ГОСТ 10179-74	Применяются в виде плит для изоляции ограждений	600
Вермикулит обожженный	ГОСТ 12865-67	Для изоляции в виде засыпки и для приготовления бетонов	900
Минеральная вата	ГОСТ 4640-76	Для изготовления матов, мат- рацев и набивки	600
Минераловатные плиты высо- котемпературные	ТУ № 5 ГКЭ и Э СССР	Для изоляции поверхностей в качестве второго слоя для ограждений	500
Минераловатные плиты на син- тетической связке	ГОСТ 9573-72	Для изоляции оборудования плитами	400
Минераловатные маты прошив- ные (в металлической сетке)	ГОСТ 21880-76	Для изоляции поверхностей	600

Наименование	ГОСТ, ТУ, ведомственные нормативно-директивные материалы	Область применения	Предельная температура применения, °C
Асбоперлитовая изоляция напылением	По указаниям ЦЭТИ Глав- энергостройпрома	Для изоляции натрубных ограждений	600
Асбест хризотилковый (различ- ных сортов)	ГОСТ 12871-67	Для приготовления масс и за- сыпной изоляции	600
Асбестовая ткань	ГОСТ 6102-67	Для изоляции и уплотнения швов	500
Асбестовый картон	ГОСТ 2850-75	Для изоляционных прокладок	600
Асбестовый шнур (с различ- ными наполнителями)	ГОСТ 1779-72	Для уплотнения и прокладки в температурных швах	400

Покровные и уплотнительные материалы

Асбоцементная штукатурка	По ведомственным инст- рукциям	Для наружного покрытия по сетке для накаркасных ога- раждений	100
Магнезиальная штукатурка Оргэнергостроя	По инструкции Энергомонта- жипроекта Минэнерго	Для уплотнения поверхностей изоляции по металлической сетке	120
Асбоизуритовая штукатурка	По ведомственным инструк- циям	В качестве отделочного слоя изоляции	800
Уплотнительная обмашка ОРГРЭС Минэнерго	По инструкции ОРГРЭС	Для уплотнения поверхностей натрубных ограждений	100
Асбестоцементдиатомовая штукатурка	По ведомственным инструк- циям	Для отделки и уплотнения го- рячих поверхностей (по сет- ке)	200

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Физико-технические показатели материалов, применяемых в ограждениях котлов

Наименование	Предельная температура, °C	Объемная масса, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°C)
<i>Строительные, огнеупорные и жаростойкие материалы</i>			
Красный (строительный) кирпич	600	1600—1800	$0,4 + 0,00044 t_{cp}$
Строительный бетон	200	2300	$1,14 + 0,0006 t_{cp}$
Кладка из шамотных изделий	1500—1600	1900	$0,6 + 0,00055 t_{cp}$
Шамотные легковесные изделия марок:			
ШБЛ 1,3	1400	1300	$0,35 + 0,0003 t_{cp}$
ШБЛ 0,8	1400	800	$0,21 + 0,0003 t_{cp}$
ШБЛ 0,4	1200	400	0,2 при 600° C
Шамотобетоны на цементе и жидком стек- ле	1100—1200	1900	$0,64 + 0,0006 t_{cp}$
Хромитовый бетон	1500	3200	$1,14 + 0,00033 t_{cp}$
Керамзитовый бетон на портландцементе с тонкомолотой добавкой	1100	1000	$0,25 + 0,00037 t_{cp}$
Упрочненный асбестодиатомовый бетон на глиноземистом цементе	1000	1000	$0,3 + 0,00035 t_{cp}$
Асбестодиатомовый термозоляционный бе- тон на цементах	800—900	800—900	$0,23 + 0,00011 t_{cp}$
Перлитобетон на асбестоцементной связке	600	400	$0,09 + 0,0002 t_{cp}$

Наименование	Предельная температура, °С	Объемная масса, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°С)
<i>Изоляционные материалы</i>			
Диатомовый термозоляционный кирпич	900	700	0,17 + 0,0002 t_{cp}
		600	0,14 + 0,0002 t_{cp}
		500	0,12 + 0,0007 t_{cp}
Пенодиатомовые изделия обжиговые	900	350	0,07 + 0,0002 t_{cp}
		400	0,08 + 0,0002 t_{cp}
Асбощементные изделия	400	400	0,07 + 0,00017 t_{cp}
Асбозурит мастичный марки 600	500	600—700	0,14 + 0,00017 t_{cp}
Асбестовая ткань в несколько слоев	400	500—600	0,11 + 0,00022 t_{cp}
Асбестовый картон	600	1000—1300	0,135 + 0,00016 t_{cp}
Асбестовый шнур	220	Дается масса 1 м длины в зависимости от диаметра	0,12 + 0,0002 t_{cp}
Асбопхушнур	220		0,105 + 0,00027 t_{cp}
Асбомагнезиальный шнур	400	—	0,096 + 0,00025 t_{cp}
Асбостеарикулитовые плиты	600	300	0,07 + 0,0002 t_{cp}
Вулканитовые плиты	600	350	0,067 + 0,00017 t_{cp}
		400	0,07 + 0,00016 t_{cp}
Совелитовые плиты	600	400	0,069 + 0,00008 t_{cp}
Совелитовая мастика	600	500	0,085 + 0,00009 t_{cp}
Перлитотрепелльные плиты	600	350	0,072 + 0,00014 t_{cp}
		400	0,077 + 0,00014 t_{cp}
Перлитогелевые изделия	650	200—250	0,047 + 0,00016 t_{cp}
Известково-кремнеземистые изделия	600	200—225	0,053 + 0,00009 t_{cp}
Перлитокерамические плиты	900	350	0,076 + 0,00017 t_{cp}
		400	0,085 + 0,00017 t_{cp}

18—130	Асбостеарикулитовые плиты	600	300	0,074 + 0,00022 t_{cp}
	То же	600	350	0,079 + 0,00022 t_{cp}
	Минераловатные плиты высокотемпературостойкие	600	300	0,067 + 0,00016 t_{cp}
			350	0,071 + 0,00016 t_{cp}
	Минераловатные плиты на синтетическом связующем	400	150—200	0,045 + 0,0002 t_{cp}
	Минераловатные матрацы, маты прошивные из ваты в сетке металлической марки:			
	125	500	250	0,052 + 0,00017 t_{cp}
	150	500	300	0,052 + 0,00017 t_{cp}
	Минераловатная изоляция в набивку (под сетку)	600	250	0,052 + 0,00017 t_{cp}
	Асбоперлитная изоляция, выполненная напылением	600	200—225	0,061 + 0,00011 t_{cp}

Покровные и уплотнительные материалы

Асбощементная штукатурка	100	1600—1800	0,33 при 50°С
Магнезиальная штукатурка ОЭС (уплотнительная)	120	1400	0,3 при 50°С
Уплотнительная обмазка ОРГРЭС	100	1600	0,35 при 50°С
Асбозуритовая штукатурка	800	800—900	0,2 при 50°С
Асбощементодиатомовая штукатурка	200	900	0,25 при 50°С

Наименование	Предельная температура, °C	Объемная масса, кг/м³	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°C)
<i>Специальные набивные массы</i>			
Хромитовая масса ПХМ-1 (без добавки глины)	1400	2800—3200	1,10—1,30 при 300—700°C
Хромитовая масса ПХМ-6 (с добавкой глины)	1400	3200—3400	1,8—1,9 при 1000°C
Карборундовая масса на жидком стекле и полифосфатных связках	1200 без шлаковой пленки, 1500 под шлаковой пленкой	2100—2300	4,0—4,5 3,02 + 0,0031 $t_{ср}$ при пневматической набивке, 2,51 + 0,0016 $t_{ср}$ при ручной набивке
Карборундовая масса на алюмофосфатной связке (ОРГРЭС)	950 в окислительной среде, 1500 в восстановительной среде	2100—2200	4,0—4,5
Карборундовая масса на триполифосфате натрия (УралВТИ)	1200 без шлака, 1500 под шлаком	2400—2500	4,0—4,5
Хромомagneзитовая масса ОРГРЭС	1500	2100—2400	1,35 + 0,00045 $t_{ср}$
Корундовая масса на фосфатной связке	1500—1650	2100—2400	0,8—1,2 при 300—700°C

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Графическое обозначение обмуровочных материалов

	Кирпич красный строительный		Диатомовый термоизоляционный кирпич
	Огнеупорный кирпич (шамотный)		Изоляция напылением (с указанием толщины)
	Огнеупорный и жаростойкий бетон		Покровная штукатурка, обмазка (с указанием толщины)
	Легковесный шамотный кирпич		Утепляющее покрытие (с указанием толщины)
	Асбестодиатомовый кирпич		Плетеная сетка (с указанием размера ячеек и Ø, мм)
	Армированные бетоны всех видов по соответствующей штриховке		Прокладка (толь, асбест, картон) (с указанием толщины)
	Изоляция зернистыми и волокнистыми материалами (засыпка, набивка и пр.)		Асбестовый шнур (с указанием Ø, мм)
	Изоляция в виде плит (советит ИКИ и пр.)		Оклейка поверхности тканью, пластиком (с указанием материала)

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Расход материалов и составы масс для ограждений котлов

В данном приложении приведены ГОСТ, ОСТ и технические условия на обмуровочные и изоляционные материалы, а также составы жаростойких бетонов и масс для обмуровки и изоляции котлов. Эти данные необходимы для выбора исходных компонентов составов масс при составлении спецификаций к проектам ограждений и изоляции.

Таблица П-5-1

Масса и размеры стандартных огнеупорных кирпичей												
№ изделий	Размеры, мм			Марки и масса изделий, кг								
	a	b	в и в/в ₁	ША-1	ША-1 и ШБ-1	ШБ-1УС	ШБ-1УС	ШБ-1УС	ШБ-1УС	ШБ-1УС	ШБ-1УС	ШБ-1УС
5	230	114	65	3,6	3,4	3,2	2,2	1,7	1,5	1,4	1,0	0,7
8	250	124	65	4,2	4,0	3,8	2,6	2,0	1,8	1,6	1,2	0,8
22	230	114	65/55	3,3	3,2	3,0	2,1	1,6	Клин торцевой (продольный)			
25	250	124	65/55	3,9	3,7	3,5	2,4	1,9				
44	230	114	65/55	3,3	3,2	3,0	2,1	1,6	Клин ребровой (поперечный)			
47	250	124	55/55	8,9	3,7	3,5	2,4	1,9				

Примечание. Огнеупорность по ГОСТ 390-69. Размеры, масса и марки по ГОСТ 8691-73.

Таблица П-5-2

Диатомовый термоизоляционный кирпич ГОСТ 2694-67				
Марка	Размеры, мм		Объемная масса 1 шт., кг	
	Большой 1К1	Малый 1К2	Большой 1К1	Малый 1К2
500	250×123×65	230×113×65	1,0	0,85
600			1,2	1,0

Таблица П-5-3

Расход шамотных и термоизоляционных кирпичей на 1 м³ кладки в штуках		Большой	Малый
Характеристика кладки и материал			
Шамотный кирпич, размеры, мм . . .	250×124×65	230×114×65	
Толщина швов в кладке 3 мм . . .	480	570	
Толщина швов в кладке 2 мм . . .	500	600	
Диатомовый термоизоляционный кирпич, размеры, мм . . .	250×123×65	230×113×65	
Толщина швов в кладке 5 мм, шт. . .	450	540	

Таблица П-5-4

Употребительные растворы и их расход, м³, для кладки обмуровки из штучных изделий (расход растворов дан на 1 м³ объема кладки)

Вид раствора	Толщина швов, мм						
	2	3	4	5	6	7	8
Огнеупорный (шамотный)	0,08	0,12	0,15	0,18	—	—	—
Сложный и цементный	—	—	—	—	0,22	0,24	0,26
Теплоизоляционный	—	—	—	0,18	0,20	0,22	0,24

Примечания: 1. Огнеупорный раствор состоит из смеси молотого шамота и огнеупорной глины.
2. Сложный раствор состоит из смеси песка, извести и цемента.
3. Теплоизоляционный — из наполнителя в виде измельченного изоляционного материала и вяжущего.

Таблица П-5-5

Расход материалов на приготовление 1 м³ шамотного раствора

Материал	Класс раствора*		
	1	2	3
Мертель огнеупорный ГОСТ 6137-61, кг	1530	1530	1530**
Шамотный порошок, кг	1100	960	810
Глина огнеупорная, кг	430	570	720
Вода, л	550	480	430

* Первый класс — для кладки с толщиной шва до 1,5 мм, второй класс — для кладки с толщиной шва до 2,0 мм, третий класс — для более грубой кладки с толщиной шва до 3 мм.

** По ГОСТ 6137-61 готовые мертели делятся на марки ВТ1 и ВТ2, соответственно тонкого помола на ШТ1 и ШТ2; шамотные тонкого помола на ШК1, ШК2, ШК3 и шамотные крупного помола.

Таблица П-5-6

Расход материалов для приготовления сложного и цементного раствора на 1 м³

Наименование материалов	Цементный раствор		Сложный раствор	
	1:3	1:4	1:1:4	1:1:6
Цемент портландский ГОСТ 10178-76, кг	525	402	351	261
Песок горный ГОСТ 8736-77, м³	1,01	1,06	0,99	1,06
Известковое тесто, м³	—	—	0,266	0,169
Вода, л	190	170	240	202

Примечание. Соотношение компонентов в растворах дано по объему: первая цифра — цемент, последняя — песок, средняя — известь.

Таблица П-5-7

Расход материалов для приготовления раствора для кладки из диатомового термоизоляционного кирпича

Наименование материалов	Состав		
	диатомо-товый	диатомо-то-цемент-ный	асбесто-цементно-диатомо-вый
Диатомит дробленый сырой (трепел молотый ТУ-136-63 ГИСС СССР), кг	570	520	360
Портландцемент (ГОСТ 10178-76), кг	—	180	260
Асбест VI сорта (ГОСТ 12871-67), кг	—	—	220
Вода, л	500	500	—

Расход материалов для приготовления 1 м³ раствора для кладки изоляционных изделий

Асбозуритовая мастика

Состав компонентов:

Асбозурит 700 (ТУ-130-63), кг	900
Вода, л	850

Совелитовая мастика

Состав компонентов:

Совелитовый порошок (ТУ-36-131-69), кг	500
Вода, л	1000

Мастика для кладки изделий из перлита

Массовое содержание компонентов, %:

Перлитовый песок размером зерен до 1,5 мм (ГОСТ 10832-74)	20
Асбест V сорта (ГОСТ 12871-67)	20
Калийное жидкое стекло с плотностью 1,3—1,5 г/см³ (МРТУ 7-9-63 ГИСС СССР)	57
Кремнефтористый натрий (ГОСТ 87-66)	3

Вода добавляется в количестве, соответствующем погружению стандартного конуса в раствор на 10—12 делений. Расход раствора на 1 м³ кладки плит составляет около 0,1 м³.

Мастика для кладки и промазки швов извлектово-кремнеземистых изделий (ИКИ)

Массовое содержание компонентов мастики I, %:

Диатомит нинский молотый (ТУ 298-56 МСПМХП, влажность не более 5%)	27,8
Стекло жидкое натриевое (ГОСТ 13078-67, плотность 1,4—1,43 г/см³)	69,4
Глина часов-ярская огнеупорная (ТУ 0-51)	2,8

278

Мастика 2 имеет следующий состав, кг:

Порошок ИКИ (из боя плит)	100
Асбест VII сорта (ГОСТ 12871-67)	110
Крахмал (технический)	35
Вода, л	745

Состав 2 дает меньшую усадку швов. Порошок ИКИ должен иметь крупность не более 2 мм.

Отделочные и уплотнительные покрытия ограждений

Расходы компонентов даны для приготовления 1 м³ покрытия.

Асбцементная штукатурка

Объемная масса составляет 1700 кг/м³. Состав штукатурки следующий:

Асбест распушенный VI сорта (ГОСТ 12871-67), кг	335
Портландцемент марки 400 (ГОСТ 10178-62), кг	1200
Вода техническая, л	1000

Асбестодиатомовая обмазка

Состав:

Асбест распушенный VI сорта (ГОСТ 12871-67), кг	230
Портландцемент марки 400 (ГОСТ 10178-76), кг	670
Диатомит молотый (трепел), кг	110
Вода техническая, л	1000

Асбозуритовая штукатурка

Объемная масса равна 950 кг/м³. Состав:

Асбозурит марки 600 или 700 (ТУ 130-63 ГИСС), кг	915
Вода техническая, л	900

Уплотнительная магниезиальная обмазка ОЭС

Объемная масса 1400 кг/м³. Состав:

Каустический магнезит II класса (ГОСТ 1216-75), кг	300
Асбест V—VI сортов (ГОСТ 12871-67), кг	800
Раствор хлористого магния объемной массой 1,2 г/см³ (хлористый магниевый технический ГОСТ 7769-73), л	450

При отсутствии хлористого магния возможна замена обогащенным карналлитом ТУ МХМ 762-41 в виде раствора объемной массой 1,2—1,25 г/см³. Для приготовления 1 м³ раствора необходимо 800—900 кг карналлита.

Уплотнительная обмазка ОРГРЭС

Объемная масса 1500 кг/м³. Состав:

Портландцемент марки не ниже 400 (ГОСТ 10178-76), кг	70
Глина огнеупорная ТУ-051 МЧМ, кг	210
Шамотный песок с максимальным размером зерен до 2 мм (ТУ 14-8-90-74), кг	560
Распушенный асбест V—VI сорта (ГОСТ 12871-67), кг	560
Жидкое стекло (плотность 1,4—1,5 г/см³, ГОСТ 13078-67), кг	150

Применяется в качестве уплотнительного слоя натрубных и щитовых обмуровок.

Опытное газоплотное покрытие УралВТИ для ограждений котлов

Состав массы, % на 1 м³:

Полвинилацетатная эмульсия средневязкая СВ	64
Вода дистиллированная (ГОСТ 6703-65) или конденсат	26
Окис хрома, марка пигментная ОХП-1 или ОХП-2 (ГОСТ 2912-73)	7
Каолин обогащенный (ГОСТ 21286-75)	3

Поверх нанесенного покрытия накладывается стеклоткань марки Т (ГОСТ 8481-75). Применять данное газоплотное покрытие рекомендуется по согласованию с технадзором в УралВТИ.

Составы и расход материалов для приготовления жаростойких бетонов, жаростойких растворов и теплоизоляционных бетонов

Расходы компонентов даны для приготовления 1 м³.

Жаростойкий бетон на глиноземеистом цементе

Максимальная рабочая температура до 1300°C. Состав:

Глиноземистый цемент марки не ниже 400 (ГОСТ 969-77), кг	400
Шамотный крупный заполнитель К (ЗШБ) (ТУ 14-3-145-75 МЧМ), кг	750
Шамотный крупный заполнитель К (ЗШБ) (ТУ 14-3-145-75 МЧМ), кг	750
Вода, л	450—500

Заполнитель берется с фракцией частиц: крупный от 5 до 20 мм, мелкий от 0 до 5 мм.

Жаростойкий бетон на портландцементе с тонкомолотой добавкой

Максимальная рабочая температура 1100°C. Состав:

Портландцемент (ГОСТ 10178-76), кг	350
Тонкомолотая добавка Т (ЗШБ) (ТУ 14-3-145-75 МЧМ), кг	120
Шамотный крупный заполнитель К (ЗШБ) (ТУ 14-3-145-75 МЧМ), кг	700
Шамотный мелкий заполнитель М (ЗШБ), кг	650
Вода, л	450—500

Тонкомолотую добавку просеивают на сите 0,5 (менее 93—100%) и на сите 0,09 (не менее 70%).

Асбестодиатомовый теплоизоляционный бетон

Максимальная рабочая температура 900°C. Состав:

Глиноземистый цемент (ГОСТ 969-77), кг	210
Диатомовая крошка (из лома диатомового кирпича крупностью до 10 мм) (ТУ 36-888-67 ММС-67), кг	435
Распушенный асбест VI сорта (ГОСТ 10871-71), кг	100

Составы жаростойких бетонов и масс на портландцементе с добавлением триполифосфата натрия (УралВТИ)

Жаростойкие бетоны

Максимальная рабочая температура 1200°C. Тяжелый бетон ПББТ имеет объемную массу 1800 кг/м³, а легкий бетон ЛПБЛ 1300 кг/м³. Состав жаростойкого бетона, % на 1 м³, следующий:

Наименование компонентов	Тяжелый ПББТ, %	Легкий ЛПБЛ, %
Портландцемент марки 400 (ГОСТ 10178-76)	30	30
Триполифосфат натрия NaP ₃ O ₁₀ (ГОСТ 13493-68)	3	3
Огнеупорная глина (ТУ 051 МЧМ)	5	5
Шамотный заполнитель (ТУ 14-3-145-75 МЧМ)	62	50
Асбест V—VI сорта (ГОСТ 12871-67)	—	12
Вода техническая (сверх 100% сухой массы)	15—25	30—35

Шамотный заполнитель крупный К (ЗШБ) и мелкий М (ЗШБ) обычно принимается в равных количествах по массе, кг. Бетон готовится по инструкции УралВТИ.

Масса для заполнения пространства между трубами и обшивочным листом

Состав массы, % на 1 м³:

Портландцемент марки 400 (ГОСТ 10178-76)	30
Шамотный порошок с крупностью зерен до 2 мм (ТУМ 8-90-74 МЧМ)	62
Огнеупорная глина (ТУ 051 МЧМ)	5
Триполифосфат натрия (Na ₃ P ₃ O ₁₀) (ГОСТ 13493-68)	3

Вода добавляется по потребности.

Масса для нанесения по сетке, натянутой на трубах, для натрубной обмуровки

Относительный шаг экрана $s/d \leq 1,10$. Состав массы, % на 1 м³:

Шамотный заполнитель из боя кирпича ШБ-1 или ШБ-2 (ГОСТ 8691-73) с размерами фракций, мм:	
15—3	55—60
3—1	30—35
<1	3
Асбест распушенный (сорт V или VI) (ГОСТ 12871-67)	12
Портландцемент марки 400 (ГОСТ 10178-76)	30
Огнеупорная глина (ТУ 051 МЧМ)	5
Триполифосфат натрия (ГОСТ 13493-68)	3

Вода добавляется сверх 100% в количестве 40—50% по отношению к сухой массе.

Составы и расходы компонентов для приготовления специальных масс для набивки по шипам

Расход массы подсчитывается по фактическому объему. Из общего объема шипов и массы, нанесенной на трубы на 1 м², вычитается объем шипов. Количество шипов на 1 м² поверхности экрана, их диаметр и высота принимаются по ОСТ 24.030.32-73, ОСТ 24.315.08-73 и ОСТ 24.410.23-75 в зависимости от конструкции экрана.

Хромитовая масса

Расход компонентов, кг, на приготовление 1 м³ хромитовой массы по данным Украинского института огнеупоров следующий:

Хромитовая масса	СХ-1 (ПХМ-1)	СХ-2 (ПХМ-6)
Хромитовые готовые смеси	3200	3300
Жидкое стекло (ГОСТ 13078-67) (плотность 1,4—1,5 г/см ³)	200—230	230

Карбундовая масса УралВТИ на триполифосфате натрия

Объемная масса равна 2100—2400 кг/м³. Состав компонентов, % на 1 м³ массы:

Карбунд (черный или зеленый) ОН 7-59

ГКСМ СССР зернистостью по ГОСТ 3647-71:

крупные фракции (№ 160—80)	31
средние фракции (№ 63—32)	30
мелкие фракции (меньше 30 мкм)	30
Огнеупорная глина (ЧМТУ ВНО 4-59)	6
Триполифосфат натрия Na ₅ P ₃ O ₁₀	3

Карбундовая масса ОРГЭС на ортофосфорной кислоте

Объемная масса 2100—2300 кг/м³. Состав массы, % на 1 м³:

Карбунд черный (ОН 7-59 ГКСМ СССР) с зернистостью по ГОСТ 3647-71:

№ 40—100	25—30
№ 6—16	40—45
Огнеупорная глина (ЧМТУ/ВНО 4-59)	25—30
Связка сверх 100% сухой массы — ортофосфорная 75%-ная кислота техническая (ГОСТ 10678-76)	15

Карбундовая масса для нанесения механизированным путем

Зерновой состав, % на 1 м³ карбундовой массы, по ГОСТ 3647-71 следующий:

Крупная фракция	40
Средняя фракция	30
Мелкая фракция	30

Карбундовая масса наносится в соответствии с инструкцией по эксплуатации Минэнерго (БРМ № 6-7091).

В качестве крупной и средней фракции принимаются шлифзерно и шлифпорошок по ОСТ 2-144-71. При отсутствии черного карбунда допускается применять зеленый. В качестве мелкой фракции применяют карбунд небразивный (ТУ 2-036-17-72 МС и МП СССР). Сверх 100% сухой массы карбунда добавляют, %:

Молотая огнеупорная глина (ТУ-051 МЧМ)	5
Триполифосфат натрия (ГОСТ 13493-68)	3
Вода	9—6

Помимо массы на триполифосфате натрия, имеются массы ОРГЭС на ортофосфорной кислоте и ДИСИ на титанофосфатной связке. Расход материалов для приготовления массы на триполи-

фосфатной связке для покрытия 1 м² ошлифованной поверхности окрашенных труб диаметром 32 мм при высоте шипов 13—16 мм и расстоянии между трубами 3—4 мм при нанесении массы на высоту шипов составляет, кг/м²:

Шлифзерна карбунда	24
Шлифпорошка карбунда	18
Шлака карбунда	18
Огнеупорной глины	3
Триполифосфата натрия	1,8
Вода	5,0

Для конструкции экрана, отличной от указанной выше, дается коэффициент пересчета расхода массы

$$k = \frac{s_1 \left(h_1 + \frac{d_1}{2} \right)}{s \left(h + \frac{d}{2} \right)},$$

где s_1 и s — шаги экранных труб фактический и расчетный; d_1 и d — наружный диаметр фактический и расчетный; h_1 и h — высота шипа фактическая и расчетная.

Хромомагнетитовая масса ОРГЭС

Объемная масса равна 2400—2800 кг/м³; состав массы, % на 1 м³, следующий:

Хромомагнетит молотый с фракциями, мм:

7—3	46
1—0,09	30
<0,09	30

Сверх 100% массы сухих компонентов необходимо добавить, %:

Жидкое стекло (ГОСТ 13078-67)	10
Огнеупорная глина (ЧМТУ/ВНО 4-59)	6
Кремнефтористый натрий (ГОСТ 87-66)	1

Карбундовая масса ОРГЭС на ортофосфорной кислоте

Объемная масса равна 2100—2400 кг/м³. Состав массы, % на 1 м³:

Электрокорунд белый ОН 110-65 ГКСМ с зернистостью по ГОСТ 3647-71:	
№ 40—100	30
№ 10—16	40
Глина огнеупорная (ЧМТУ/ВНО 4-59)	30

Сверх 100% сухой массы добавляется 15% 75%-ной ортофосфорной кислоты (ГОСТ 10678-63).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 2-1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). М.: Энергия, 1973.
- 2-2. Ответы японских специалистов на вопросы по теплоизоляционным работам на ТЭС и АЭС: Пер. с англ. № 3210-а. Информэнерго Мияэнегэ, М.: 1974.
- 2-3. Гителевич А. В. Теплоизоляция на зарубежных электростанциях. — Энергетическое строительство, 1964, № 12, с. 27—29.
- 2-4. Казаров С. А., Михайлов С. Я. Основные результаты освоения топливного газолидного котлоагрегата ТГМП-324. — Электрические станции, 1974, № 7, с. 9—14.
- 3-1. Залкинд И. Я., Троянкин Ю. В. Огнеупоры и шлаки в металлургии. М.: Изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1964.
- 3-2. Теплозащита изоляции. Справочник по специальным работам/Под ред. Г. Ф. Кузнецова. М.: Стройиздат, 1976.
- 3-3. Труды Центрального котлотурбинного института. Вып. 11. Л.: ЦКТИ, 1965.
- 3-4. Зеленский В. Н., Костенко А. В. Жаропрочные чугуны. — Энергомашиностроение, 1961, № 8, с. 35—38.
- 4-1. Инструкция по ремонту обмуровки паровых котлов электростанций. М.: —Л.: Энергия, 1966.
- 4-2. Зотов А. В. Перспективы широкого применения жаропрочных бетонов и железобетона в строительстве тепловых агрегатов. — В кн.: Жаропрочные бетон и железобетон в строительстве. М.: Стройиздат, 1962, с. 10—13.
- 4-3. Стрелкова К. С., Пешехонов Н. Д., Сперкач М. М. Элемент сборной обмуровки для мощных котлоагрегатов. Информационный листок, № 125—76. Челябинск: 1976.
- 4-4. Нагрубная обмуровка котлов ПК-19/Буринца Т. В., Бычковский А. Л., Васильева Г. И., Залкинд И. Я., Лебедева М. Ф., Озерков Ю. И. — Электрические станции, 1956, № 5, с. 5—12.
- 4-5. Модель З. Г. Мощный прямоточный котел ПК-33-83СП. — Энергомашиностроение, 1960, № 4, с. 1—7.
- 4-6. Теплотехнические особенности обмуровки и тепловой изоляции котла БКЗ-420-140-1/Пешехонов Н. Д., Павлов Н. В., Котельников В. В., Пилигин В. Ф., Стрелкова К. С., Литвицкий В. Я., Павлов А. С. — Электрические станции, 1970, № 6, с. 14—18.
- 5-1. Применение плит автоклавного изготовления для сборной обмуровки котлоагрегатов/Козлов Ю. В., Кузьмин А. И., Ляхманов А. И., Сотников И. А., Селезнев Н. В. — Электрические станции, 1977, № 8, с. 23—26.
- 5-2. Козлов Ю. В. Механическая резка обмуровки на двухлопастных ИКП в монтажных условиях. — Экспресс-информация. Сер. Монтаж оборудования на тепловых электростанциях, 1973, № 5, с. 13—15.
- 5-3. Пескин В. Ю., Копытов Д. П. Монтаж обмуровки котла П-57 энергоблока 500 МВт Троицкой ГРЭС. — Энергетическое строительство, 1975, № 9, с. 19—22.
- 6-1. Минков В. А., Пазухин В. В., Карабан С. С. Влияние присосов на величину потерь с уходящими газами. — Электрические станции, 1968, № 6, с. 27—29.
- 6-2. Жуков Г. И. Измерение величины локальных присосов в точечную камеру. — Электрические станции, 1968, № 6, с. 24—27.
- 6-3. Лебедева М. Ф., Янакисов Л. Ф. Применение уплотнительных

штукатурок и обмазок в обмуровке паровых котлов. Информационное сообщение № Т—12/60. М.: Госэнергоиздат, 1960.

- 6-4. Залкинд Е. М., Евсеев Н. В. Обмуровка мощных энергетических котлов. — Энергетическое строительство, 1969, № 1, с. 19—21.
- 6-5. Залкинд Е. М. Применение стальной обшивки для натрубной обмуровки. — Электрические станции, 1968, № 1, с. 9—12.
- 6-6. О возможности применения синтетических материалов в котлостроении/Греков Д. И., Перкатов А. И., Киптайчик В. Л., Секретарь В. П. — Теплоэнергетика, № 3, 1964, с. 28—32.
- 6-7. Опыт применения стеклопластикового покрытия обмуровки котлов ПК-33/Мурашов А. Ф., Марусен Ю. М., Смирнов Б. С., Тогрин В. В. — Электрические станции, 1971, № 8, с. 86—87.
- 7-1. Труды Центрального котлотурбинного института. Вып. 107. Л.: ЦКТИ, 1971.
- 7-2. Лейб Х. Опыт работы паровых котлов без обмуровки с газоплотными сварными стенами. — Экспресс-информация. Сер. Теплоэнергетика, 1968, № 23, с. 1—12.
- 7-3. Франк Б. Котлы без обмуровки. — Экспресс-информация. Сер. Теплоэнергетика, 1963, № 30, с. 1—6.
- 7-4. Гольберг А. И., Левченко Г. Н. Совершенствование узлов мембранных экранов. — Энергетическое оборудование (НИИЭФОРМТ)ЖМАШ), 1975, № 14, с. 24.
- 7-5. К вопросу о выборе способа изготовления мембранных экранов котлов СКД/Земин В. Н., Зверьков Б. В., Мочан С. И., Гольберг А. И. — Энергомашиностроение, 1973, № 10, с. 5—7.
- 7-6. Воронков С. Т., Корнер И. М. Производственные испытания теплоизоляционных конструкций на электростанциях. — В кн.: Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС. Вып. 30. ОРГРЭС, 1964, с. 35—43.
- 7-7. Зеленцовский Л. И. Внедрение цинкоалюминатной мастики для тепловой изоляции. — Экспресс-информация. Сер. Монтажное оборудование на тепловых электростанциях, 1975, № 2, с. 7—9.
- 7-8. Пескин В. Ю., Давыдов В. С. Обмуровка газолидных котлов. — Энергетическое строительство, 1974, № 5, с. 4—9.
- 7-9. Евневич Ю. А. Применение алюминиевых сплавов в ограждающих конструкциях гражданских и промышленных зданий (опыт зарубежного строительства). М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1971.
- 7-10. Репин С. И. Прочность корабля (конспект лекций ЛКИ). Л.: ЛКИ, 1974.
- 7-11. Справочник по строительной механике корабля. Т. 3. Л.: Судпромгиз, 1960.
- 7-12. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973.
- 7-13. Воронков С. Т. Эксплуатация и ремонт тепловой изоляции и обмуровки энергетических установок. М.: Энергия, 1974.
- 7-14. Лозовский Ю. Д. Оборудование для выполнения напыляемой изоляции и работы Всесоюзного объединения Союзэнергозащита по его совершенствованию. — В кн.: Выполнение обмуровочных конструкций паровых котлов методом напыления (тезисы докладов). М.: Информэнерго, 1975, с. 8—14.
- 7-15. Воронков С. Т. Новая технология монтажа тепловой изоляции методом напыления. — В кн.: Основные пути технического прогресса и повышение производительности труда при выполнении специальных работ в теплоэнергетическом строительстве (тезисы докладов). М.: Информэнерго, 1974, с. 33—35.

- 7-16. Факторович Л. М. Краткий справочник по тепловой изоляции. Л.: Гостотехиздат, 1962.
- 8-1. Маршак Ю. Л. Топочные устройства с вертикальными циклонными предтопочками. М.: Энергия, 1966.
- 8-2. Маршак Ю. Л., Рыжиков А. В. Шиповые экраны топок паровых котлов. М.: Энергия, 1969.
- 8-3. Бычковский А. Л. Утепляющие экраны парогенераторов. М.: Машиностроение, 1976.
- 8-4. Поляков С. А., Соломатина Т. В., Шинкина Л. М. Использование неабразивного карбида кремния в набиных массах для футеровок топок котлоагрегатов. — Огнеупоры, 1975, № 7, с. 32—34.
- 8-5. Лазовский В. А., Воронков С. Т. Торкретирование оштукатуренных экранов котлоагрегатов. М.: Энергия, 1975.
- 8-6. Бычковский А. Л., Бондарев А. И., Козлов Ю. В. Шипы из стали 12Х1МФ для повышения долговечности утепленных топок. — Энергомашиностроение, 1967, № 7, с. 16—19.
- 8-7. Залкинд И. Я., Соломатина Т. В. Огнеупорные массы для футеровок котельных топок. — Теплоэнергетика, 1965, № 9, с. 28—30.
- 8-8. Кляни Е., Ламбрект Д. — Экспресс-информация. Сер. Теплоэнергетика, 1967, № 24, с. 8—35.
- 8-9. А. С. 228220/СССР. Топочный экран/Бычковский А. Л., Коноплев Е. И., Козлов Ю. В. — Опубл. в бжд. «Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1968, № 31.
- 8-10. Коноплев Е. И. Утепленные экраны из труб с поперечными ребрами. Автореф. дис. на соиск. учен. степеней канд. техн. наук/ВЗПИ. М.: 1971.
- 9-1. Залкинд И. М. Материалы обмуровок и расчет ограждений паровых котлов. М.: Энергия, 1972.
- 9-2. Расчет и проектирование цельносварных экранов котельных агрегатов/Гольдберг А. И., Корягин В. С., Мочан С. И., Тынтярев Э. М. Л.: Энергия, 1975.
- 9-3. Шорин С. Н. Теплопередача. М.: Стройиздат, 1952.
- 9-4. Труды Центрального котлотурбинного института. Вып. 27. Л.: ЦКТИ, 1969.
- 9-5. Мачинский В. Д. Теплотехнические основы строительства. М.: Стройиздат, 1949.
- 9-6. Жилинский К. Я. Судовая теплоизоляция. Л.: Судпромгиз, 1962.
- 9-7. Хижняков С. В. Практические расчеты тепловой изоляции. М.: Госэнергоиздат, 1959.
- 9-8. Стрелкова К. С. О решении смешанной краевой задачи теплопроводности в составном прямоугольнике. — ИФЖ, 1968, т. 14, № 4, с. 645—650.
- 9-9. Петров-Денисов В. Г., Жидков Г. А. Оценка теплозащитных свойств футеровок с помощью решения краевой задачи теплопроводности в составном прямоугольнике. — В кн.: Сборник трудов ВНИПИ. Теплопроект. Вып. 17. 1971, с. 43—50.
- 9-10. Козлов Ю. В., Коноплев Е. И. Аналитические исследования температурных полей ограждающих поверхностей со сквозными и несквозными теплопроводными включениями. — Теплоэнергетика, 1973, № 3, с. 77—79.
- 10-1. Фильчаков Н. Ф., Паичишина В. И. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге. Киев: Изд-во АН УССР, 1961.

- 10-2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
- 10-3. Козлов Ю. В., Таран Л. И., Залкинд И. Я. Исследование температурных полей обмуровки методом электротеплоаналогии. — Электрические станции, 1973, № 5, с. 18—20.
- 10-4. Расчет влияния теплопроводных элементов на потери тепла через ограждающие конструкции паровых котлов/Корягин В. С., Козлов Ю. В., Головин М. В., Зиньченко Н. А., Тюрин Ю. А., Таран Л. И. — Энергетическое строительство, 1979, № 3, с. 43—47.
- 12-1. Стенд для испытания плитной обмуровки/Бычковский А. Л., Липец А. У., Козлов Ю. В., Кормер И. М. — Электрические станции, 1969, № 10, с. 26—29.
- 12-2. Залкинд И. Я., Козлов Ю. В., Кормер И. М. Определение газового сопротивления котельной обмуровки. — Электрические станции, 1970, № 8, с. 11—13.
- 12-3. Бычковский А. Л., Козлов Ю. В. Испытание натуральных узлов обмуровки на заводском стенде. — Электрические станции, 1971, № 2, с. 23—26.
- 12-4. Бычковский А. Л., Коноплев Е. И., Моделъ З. Г. Пористая обмуровка. — Энергомашиностроение, 1965, № 1, с. 45—46.
- 12-5. Козлов Ю. В. Опытная сборка и стендовые испытания обмуровочного блока из двухслойных ИКП. — Энергетическое строительство, 1974, № 6, с. 22—25.
- 12-6. Арутюнян Н. Е., Козлов Ю. В., Ольшанская А. Г., Торгош В. В. Сушка монолитных обмуровочных плит. — Энергетическое строительство, 1976, № 5, с. 30—34.
- 12-7. Инструкция по производству обмуровочных работ при монтаже крупных котлоагрегатов. М.: Информэнерго, 1973.
- 12-8. Жуков В. В., Козлов Ю. В. О режиме сушки обмуровки котлов. — Энергетическое строительство, 1977, № 6, с. 46—49.
- 12-9. Испытание быстротвердеющей напыляемой изоляции с наружным газоплотным покрытием/Козлов Ю. В., Воронков С. Т., Ольшанская А. Г., Васильева Г. Б. — Реферативная информация. Сер. Теплоэнергетика и изоляционные работы, 1976, № 6 (114), с. 5—8.
- 12-10. Стендовые исследования температурного режима утепленных с малотеплопроводными набивками/Бычковский А. Л., Рубин М. М., Козлов Ю. В., Сорокопуд Л. М. — Энергомашиностроение, 1969, № 2, с. 19—22.
- 12-11. Коноплев Е. И., Бычковский А. Л., Козлов Ю. В. Температурный режим утепленных труб с поперечными ребрами. — Энергомашиностроение, 1968, № 12, с. 6—9.
- 12-12. Козлов Ю. В., Кузьмин А. И. Испытание обмуровки из двухслойных ИКП на котле ПК-41. — Энергетическое строительство, 1973, № 1, с. 27—30.
- 12-13. Натрубная обмуровка цельносварной плавниковой СРЧ котла ПК-38/Бычковский А. Л., Козлов Ю. В., Воронков С. Т., Сорокин А. П., Васильева Г. Н., Кормер И. М., Кузьмин А. И. — В кн.: Труды ЦКТИ. Вып. 107. Л.: ЦКТИ, 1971, с. 146—154.
- 12-14. Методические указания по тепловым испытаниям обмуровки и тепловой изоляции котлоагрегатов. М.: БТИ ОРГРЭС, 1967.